

Разработка гибкой тонкопленочной радиопоглощающей структуры для УВЧ- и ближнего СВЧ-диапазонов

© В.Ю. Бузько,^{1,2} А.И. Горячко,¹ С.Н. Иванов,^{1,2} И.Ю. Шуткин,¹

¹Кубанский государственный технологический университет,
350072 Краснодар, Россия

²Кубанский государственный университет,
350040 Краснодар, Россия
e-mail: Ivanin18071993@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 июля 2022 г.

В окончательной редакции 19 декабря 2022 г.

Принято к публикации 15 января 2023 г.

Разработана и создана широкополосная печатная тонкослойная радиопоглощающая структура на основе массива связанных дипольных антенн, изготовленных методом магнетронного напыления тонких пленок меди и никрома на лавсановую подложку. Полученный тонкопленочный материал обладает выраженным радиоэкранированием в диапазоне частот 4–6 GHz. Созданный материал может применяться для решения задач экранирования электромагнитных волн и снижения уровня электромагнитной эмиссии от различных устройств в диапазоне частот 4–7 GHz, а также для создания специальных строительных радиоэкранирующих материалов.

Ключевые слова: радиопоглощающий экран, магнетронное напыление, массив печатных антенн.

DOI: 10.21883/JTF.2023.03.54851.185-22

Введение

Вопрос снижения электромагнитной эмиссии от радиоэлектронных устройств имеет большое значение по причине негативного влияния электромагнитных волн (ЭМВ) УВЧ- и СВЧ-диапазонов на чувствительное радиотехническое оборудование [1–4] и организм человека [4–8]. Эффективного снижения электромагнитной эмиссии от радиоэлектронных устройств можно добиться путем размещения широкодиапазонных радиопоглощающих экранов (РПЭ), размещаемых внутри корпуса устройств, обеспечивающих необходимый уровень электромагнитного экранирования.

Широкодиапазонные радиопоглощающие экраны за рубежом создаются на основе плоских тонкопленочных антенных структур [9–16], на фольгированных материалах типа стеклотекстолитовых ВЧ/СВЧ-плат [9]. Однако данные радиопоглощающие экраны отличаются довольно значительным весом при большой площади экранируемого корпуса излучающего устройства, а также имеется проблема создания массивов протяженных дипольных элементов большого размера для частот дециметрового диапазона [9,13–16]. Более перспективным следует признать направление создания гибких широкодиапазонных РПЭ с помощью технологий трафаретной печати [17]. Такие структуры, изготовленные методами тонкопленочной технологии (масковое магнетронное или электронно-лучевое напыление, печать металлизированными чернилами и т.д.) могут иметь как выраженное широкодиапазонное радиопоглощение, так и широкодиапазонное радиоэкранирование.

Целями настоящей работы выбраны разработка и исследование тонкослойной радиопоглощающей и радиоэкранирующей структуры на основе массива связанных дипольных антенн для получения широкодиапазонного РПЭ, пригодного для эффективного снижения уровня электромагнитных излучений от радиотехнических устройств в диапазоне частот 2–7 GHz в машиностроении и специализированном строительстве.

1. Математическое моделирование

На первом этапе было выполнено моделирование электромагнитных параметров определенной конфигурации тонкослойной радиопоглощающей структуры на основе массива связанных парных треугольных дипольных антенн. Для выполнения этой задачи был использован пакет программного обеспечения AWR Design Environment, позволяющий проектировать и изучать различные СВЧ-структуры. Были смоделированы пассивные широкодиапазонные структуры РПЭ на основе медных треугольных диполей, размещаемых на поверхности диэлектрической подложки.

Первый промоделированный образец представляет собой массив из не связанных медных треугольных диполей с перемычкой на полимерной лавсановой подложке толщиной 75 μm (рис. 1, *a*), для которого представлена зависимость рассчитанного комплексного коэффициента передачи S_{21} от частоты электромагнитного излучения (рис. 1, *b*).

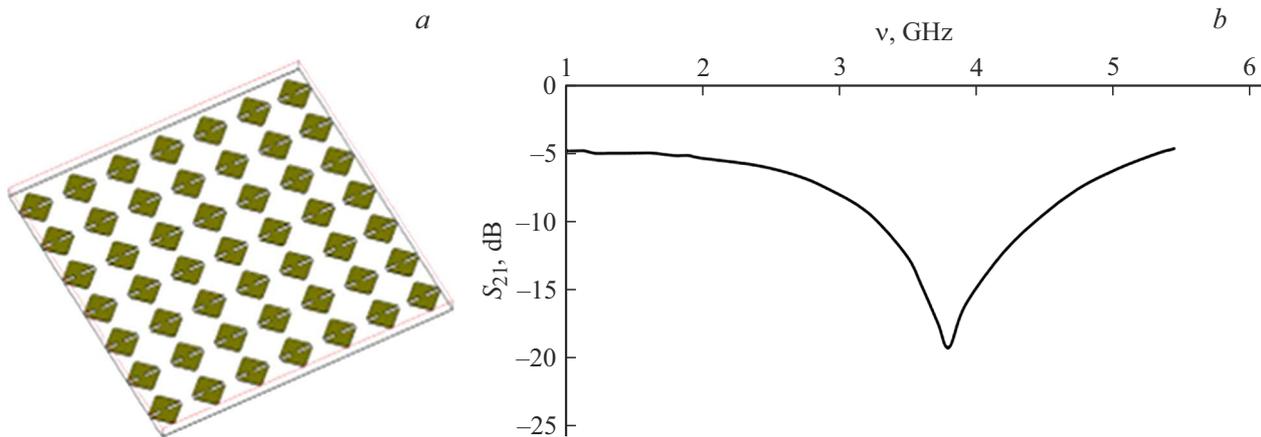


Рис. 1. Модель РПЭ на основе не связанных медных треугольных диполей на лавсановой подложке (a) и частотная зависимость параметра S_{21} (b).

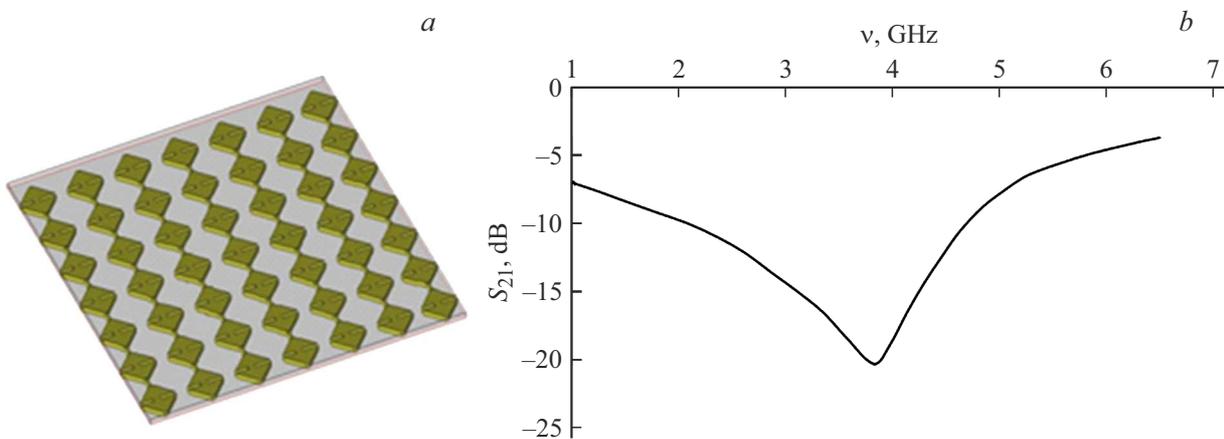


Рис. 2. Модель РПЭ на основе массива связанных медных треугольных диполей на лавсановой подложке (a) и частотная зависимость параметра S_{21} (b).

Максимальная величина радиоэкранирования, полученная моделированием, составляет для описанной структуры -19.0 dB на частоте 3.82 GHz.

Второй промоделированный образец представляет собой массив из электрически связанных медных треугольных диполей с перемычкой на полимерной лавсановой подложке толщиной $75 \mu\text{m}$ (рис. 2, a), для которого представлена зависимость рассчитанного комплексного коэффициента передачи S_{21} от частоты электромагнитного излучения (рис. 2, b). Максимальная величина радиоэкранирования, полученная моделированием, составляет для описанной структуры -20.5 dB на частоте 3.72 GHz. Эту структуру было решено использовать далее в качестве основы для создания РПЭ.

Анализ литературы по подходам и методам создания тонкослойных РПЭ показал [9–17], что наиболее распространенными и эффективными способами создания РПЭ являются химическое вытравливание, печать 3D-принтером или напыление металлизированного рисунка массива поглощающих элементов на поверхность ди-

электрической подложки. Нами при создании тонкослойного РПЭ был выбран метод магнетронного напыления металлизированных контуров как более перспективный по сравнению с методом травления печатных плат в отношении массовых характеристик создаваемых РПЭ.

2. Экспериментальная часть. Изготовление РПЭ

В настоящей работе были использованы следующие материалы: медная фольга толщиной 0.3 mm (чистотой 99.99%, КНР) в качестве мишени для магнетронного напыления, никромовая фольга марки X20H80 толщиной 0.35 mm (РФ) в качестве мишени для магнетронного напыления, лавсан толщиной $75 \mu\text{m}$ (КНР), ацетон (технический, РФ), виниловая пленка (КНР). Для создания РПЭ на основе треугольных связанных диполей была спроектирована и изготовлена с помощью ножевого плоттера специальная трафаретная маска из виниловой пленки (рис. 3, a), использовавшаяся при напыления

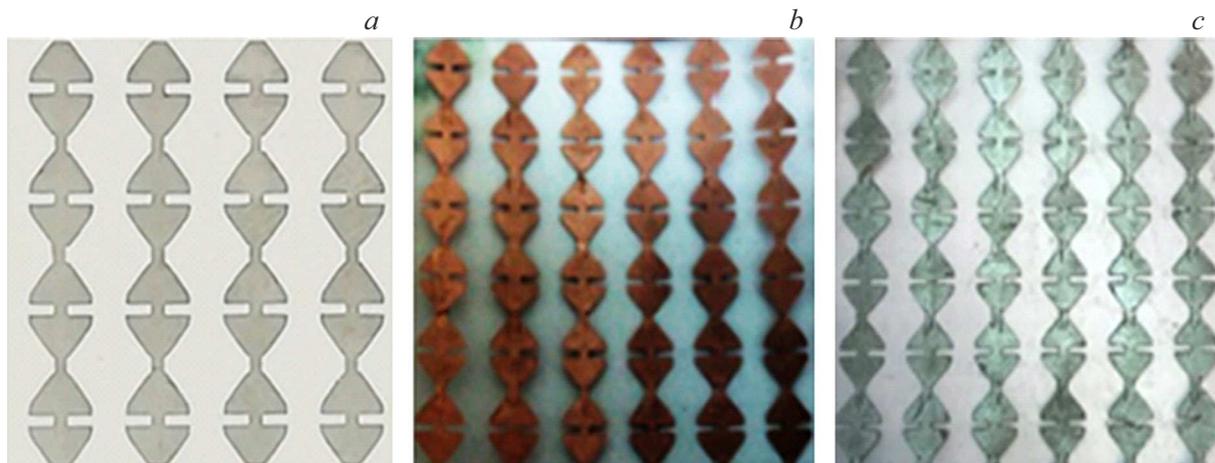


Рис. 3. Фрагменты компонентов для изготовления РПЭ: *a* — трафаретная маска для изготовления РПЭ, лежащая на алюминиевой подложке; *b* — образец РПЭ на основе связанных медных треугольных диполей на лавсановой подложке; *c* — образец РПЭ на основе связанных медных треугольных диполей на лавсановой подложке с защитным нихромовым покрытием.



Рис. 4. Измерение уровня 3G-сигнала смартфона с экранированием тонкослойными изготовленными РПЭ.

медного металлического слоя толщиной 300 нм с помощью установки магнетронного напыления Quorum Q150T. Сила тока для магнетронного напыления с аргонной плазмой составляла 80 мА при скорости напыления 40 нм/мин. Полученная структура РПЭ (рис. 3, *b*) от окисления защищалась двумя слоями акрилатного лака суммарной толщиной около 10–12 мкм, наносимого спрей-методом.

Как известно, большинство современных смартфонов могут показывать уровень входящего сигнала в единицах „дВμV/m“, благодаря чему имеется наглядная возможность исследования пропускной способности созданного РПЭ на основе связанных медных треугольных диполей на гибкой лавсановой подложке подручными средствами (рис. 4). Цифровой индикатор смартфона демонстрирует уровень мощности входящего сигнала 3G-сотовой связи на частоте 2.145 GHz в диапазоне от –40 до –130 дВμV/m.

Десятикратно проведенные эксперименты показали, что экранирование смартфона созданным РПЭ на основе связанных медных треугольных диполей на гибкой лавсановой подложке снижает уровень приема 3G-сигнала на 15–22 дВμV/m, а в среднем на 17.9 дВμV/m.

Было обнаружено, что с течением времени (более недели) наблюдается нежелательный эффект окисления пленки меди несмотря на наличие защитного слоя акрилатного лака, что снижает эффективность радиоэкранирования 3G-сигнала изготовленным экраном до среднего уровня 14.2 дВμV/m. Для устранения эффекта окисления меди на вновь созданные образцы РПЭ на основе связанных медных треугольных диполей на гибкой лавсановой подложке сверху напылялся защитный антикоррозионный слой из нихрома X20H80 толщиной 50 нм. Полученный образец модифицированного РПЭ представлен на рис. 3, *c*.

Были измерены частотные зависимости параметра потерь при отражении S_{11} в свободном пространстве для созданного РПЭ на лавсановой подложке при размещении за ним пластины из алюминия размерами 300 × 300 мм и при перпендикулярном облучении РПЭ. В качестве генератора сигналов и анализатора спектра использовался векторный анализатор цепей KC901V (Deerpace Technology, КНР) и широкодиапазонные логпериодические печатные антенны KC R100B для диапазона 0.38–8 GHz с коаксиальной линией питания на 50 Ω. Калибровку измерительной трассы осуществляли без РПЭ с использованием радиоотражающей алюминиевой пластины, располагающейся на листовом радиопоглощающем материале ECCOSORB® AN (Laird Technologies, США). Результатом измерения параметра S_{11} для массива 2 × 2 из изготовленных РПЭ общими размерами 200 × 200 мм на основе связанных металлизированных диполей при вертикальной поляризации сигнала является следующая частотная зависимость (рис. 5).

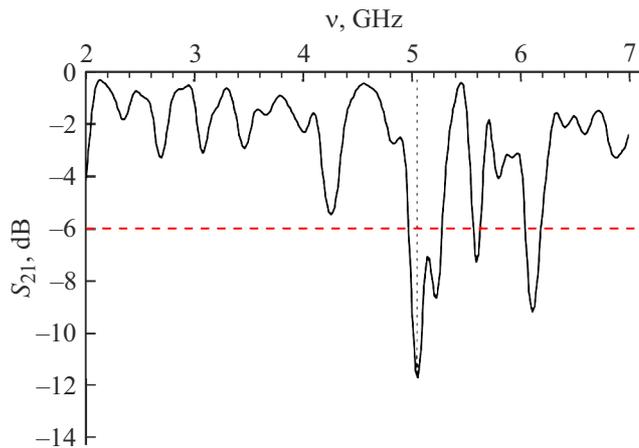


Рис. 5. Частотная зависимость параметра S_{11} для массива 2×2 из изготовленных РПЭ.

Согласно данным рис. 4, созданный РПЭ на основе металлизированных диполей имеет выраженные пики радиопоглощения в диапазоне частот от 4 до 6 GHz.

Были измерены частотные зависимости параметра передачи S_{21} в свободном пространстве для созданного РПЭ на лавсановой подложке. При создании измерительного стенда использовали рекомендации [18]. В качестве генератора сигналов и анализатора спектра использовались векторный анализатор цепей KC901V (Deerace Technology, КНР) и широкодиапазонные логпериодические печатные антенны KC R100B для диапазона 0.38–8 GHz с коаксиальной линией питания на 50 Ω. Эффективность электромагнитного экранирования исследуемого экрана определялась из измеренных значений S_{21} , определенных методом векторного анализа цепей, посредством использования следующей форму-

лы [19]:

$$SE_{\square} = 20 \cdot \log_{10} |S_{21}|. \quad (1)$$

Результатом измерения параметра S_{21} для массива 2×2 из изготовленных РПЭ общими размерами 200×200 mm на основе связанных медных диполей при вертикальной поляризации сигнала является следующая частотная зависимость (рис. 6).

Согласно экспериментальным данным измерений с широкодиапазонными логпериодическими антеннами в исследованном диапазоне частот 2–7 GHz изготовленная печатная радиопоглощающая структура обладает коэффициентом прохождения сигнала с уровнем потерь > -10 dB при частотах электромагнитного излучения в диапазоне от 4.17 до 5.56 GHz (рис. 6, a). Наблюдаемое несоответствие вида частотной зависимости расчетного (рис. 2, b) и экспериментального модуля потерь при пропускании (рис. 6, a) созданного радиопоглощающего экрана связано, на наш взгляд, со следующими причинами: 1) неточное знание необходимых электродинамических параметров, которые применялись при моделировании тонкопленочных металлических материалов, изготовленных при магнетронном напылении; 2) технические проблемы в изготовлении печатного массива связанных дипольных антенных элементов; 3) неучет влияния использованного защитного антикоррозийного слоя нихрома толщиной 50 nm.

Заключение

Данный тип экранирующей частотно-селективной структуры имеет окно прозрачности в диапазоне 2–3 GHz и широкодиапазонное радиоэкранирование в диапазоне частот электромагнитных волн от 4 до 7 GHz, которое зависит от типа поляризации электромагнитной

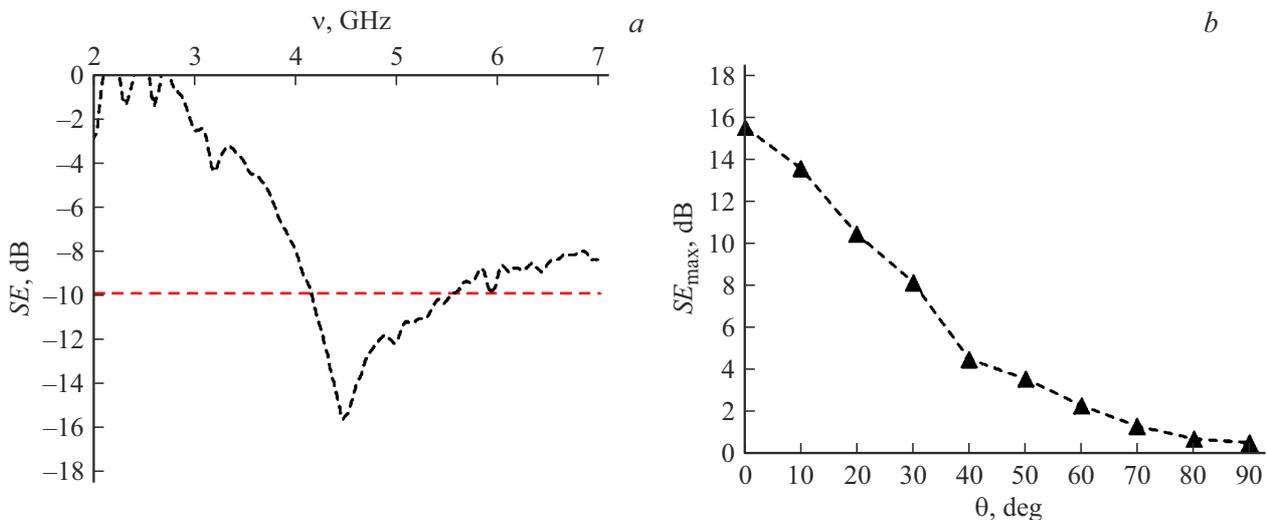


Рис. 6. Характеристики массива 2×2 из изготовленных РПЭ: частотная зависимость параметра S_{21} для массива 2×2 из изготовленных РПЭ (a); зависимость максимального уровня затухания сигнала от угла поворота РПЭ по отношению к антеннам (b).

волны и от углов облучения. При этом радиоэкранирование от 4 до 7 GHz преимущественно обусловлено радиопоглощением ЭМВ в тонких пленках меди и никрома в форме ромбовидных диполей со щелью. При изменении угла положения РПЭ относительно поляризации падающего электромагнитного излучения от логпериодической облучающей антенны уменьшается эффективность наблюдаемого радиоэкранирования РПЭ (рис. 6, б). По расчетным электромагнитным параметрам предложенная скрещенная радиопоглощающая экранная структура может быть отнесена к метаматериалам [20].

Таким образом, в результате выполнения работы была спроектирована, оптимизирована и изготовлена гибкая тонкослойная печатная радиопоглощающая структура, пригодная для эффективного снижения уровня электромагнитных излучений от радиотехнических устройств в диапазоне частот 4–7 GHz.

Финансирование работы

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Кубанского Научного Фонда и ФБГОУ ВО Кубанский государственный технологический университет в рамках научного проекта № МФИ-П-20.1/9 „Разработка и исследования строительных и конструкционных материалов со специальными электромагнитными свойствами“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Р.Р. Гайнутдинов, З.М. Гизатуллин. Технологии электромагнитной совместимости, **3**, 44 (2010).
- [2] Р.П. Быстров, В.Г. Дмитриев, А.А. Потапов, Ю.М. Перунов, В.А. Черепенин. РЭНСИТ, **6** (2), 129 (2014).
- [3] А.А. Акбашев, Н.Б. Балюк, Л.Н. Кечиев. *Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий* (Грифон, М., 2014)
- [4] С.С. Щесняк. *Методы расчета средств защиты радиоэлектронных систем от электромагнитного излучения* (СВВМ, СПб., 2016), 310 с.
- [5] В.А. Банный, В.А. Игнатенко, А.С. Азаренок, Л.А. Евтухова. *Проблемы здоровья и экологии*, **56** (2), 4 (2018).
- [6] S. Batool, A. Bibi, F. Frezza, F. Mangini. European Review For Medical And Pharmacological Sciences, **23** (7), 3121 (2019). DOI: 10.26355/eurrev_201904_17596
- [7] N. Wongkasem Electromagnetic Biology and Medicine, **2** (40), 236 (2021). DOI: 10.1080/15368378.2021.1874976
- [8] K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker, A. Wood. J. Exposure Science & Environmental Epidemiology, **31**, 585 (2021). DOI: 10.1038/s41370-021-00297-6
- [9] Y. Shang, S. Xiao, B.Z. Wang. Microwave Optical Technol. Lett., **56** (5), 1200 (2014). DOI: 10.1002/mop.28288
- [10] W. Chen, C.A. Balanis, C.R. Birtcher. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **63** (6), 2636 (2015). DOI: 10.1109/TAP.2015.2414440
- [11] W. Jiang, Y. Liu, S. Gong, T. Hong. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., **8**, 1275 (2009). DOI: 10.1109/LAWP.2009.2037168
- [12] M.Z. Joozdani, M.K. Amirhosseini, A. Abdolali. Electron. Lett., **52** (9), 767 (2016). DOI:10.1049/EL.2016.0336
- [13] Y. Chang, W. Che, Y. Han, Y. Chow. IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett., **13**, 1084 (2014). DOI: 10.1109/LAWP.2014.2327961
- [14] B.-Y. Wang, S.-B. Liu, B.-R. Bian, Z.-W. Mao, X.-C. Liu, B. Ma, L. Chen. J. Appl. Phys., **116**, 094504 (2014). DOI: 10.1063/1.4894824
- [15] D. Sood, C. Tripathi. Appl. Phys. A, **122** (4), 332 (2016). DOI: 10.1007/S00339-016-9884-2
- [16] J.C. Iriarte Galarregui, A.T. Pereda, J.L.M. de Falcón, I. Ederra, R. Gonzalo, P. de Maagt. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **61** (12), 6136 (2013). DOI:10.1109/TAP.2013.2282915
- [17] W.-J. Lee, J.-W. Lee, C.-G. Kim. Compos. Sci. Technol., **68** (12), 2485 (2008). DOI: 10.1016/J.COMPOSITECH.2008.05.006
- [18] Е.А. Штагер, А.С. Щесняк, В.П. Белов, Д.О. Хабиров. Технологии ЭМС, **67** (4), 40 (2018).
- [19] S. Geetha, K.K.S. Kumar, C.R.K. Rao, M. Vijayan, D.C. Trivedi. J. Appl. Polymer Sci., **112**, 2073 (2009). DOI:10.1002/app.29812
- [20] P.N. Kaleeba, A. Tennant, B. Chambers, J.P. Idez. Antennas and Propagation Society International Symposium IEEE, **4**, 295 (2003). DOI:10.1109/APS.2003.1220178