

Особенности взаимодействия электромагнитного излучения с композиционным текстилем на основе войлока и полипиррола

А. Е. Щербаков

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

ОАО «Завод Магнетон»

a.e.shcherbakov@bk.ru

Аннотация. В работе рассмотрено взаимодействие электромагнитного излучения с композиционными материалами на основе войлока в качестве матрицы и полипиррола с различной морфологией (в виде глобул, нанотрубок). Композитный материал получен методом гетерофазного синтеза полимера в объеме текстиля. Для получения параметров прохождения, отражения и поглощения электромагнитного излучения, использовался волноводный метод измерения.

Ключевые слова: радиопоглощающие материалы; электропроводящие полимеры; полипиррол; экранирование; электромагнитное излучение

I. ВВЕДЕНИЕ

Роль электромагнитного излучения (ЭМИ) в современной науке и технике за последние 50 лет выросла многократно. Однако за возросшими перспективами использования растет и его негативное влияние. Общая «загрязненность» фона является проблемой при проектировании антенной техники, работе приборов и вычислительных машин [1, 2, 3]. Отрицательным фактором, также является негативное влияние излучения на организм человека [3, 4]. С целью уменьшения влияния негативных факторов идет непрерывный процесс создания и разработки радиопоглощающих материалов (РПМ). Существует огромное многообразие РПМ, отличающихся составом, способами производства и сферами применения [5]. Данные материалы имеют свои недостатки, такие как узкая полоса рабочего диапазона, подверженность коррозии, недостаточность механической прочности или присутствие высокой степени переотражения [6–8]. В связи с этим все большее внимание уделяется новым типам материалов, таким как электропроводящие полимеры (ЭПП). Исследуются радиопоглощающие свойства ЭПП как в чистом виде, так и в составе композиционных материалов [9–18]. Такие сложные композиционные материалы требуют также развития специальных методов исследования, позволяющих изучать не только морфологию, но и различные свойства материалов (электрофизические, механические, магнитные и др.). Методы сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), особенно в комбинации с различными технологическими подходами позволяют проводить такие исследования с высокой локальностью [18–20]. В предыдущих работах нашей команды

методиками на основе СЗМ было выявлено особенности зарождения и роста полианилина на начальных этапах роста полимера на различных подложках, включая магнитные материалы, при создании композиционных материалов для радиопоглощающих покрытий на основе наночастиц типа «ядро-оболочка» [20–22]. Учитывая структурные особенности ЭПП, их низкую плотность, коррозионную стойкость и биосовместимость целесообразно использовать полимеры в качестве средств радиопоглощения как в промышленности, так и для специальных задач в сфере защиты человека.

В связи с этим настоящее исследование фокусировалось на разработке новых радиопоглощающих средств для защиты человека. В качестве материала матрицы композита выбран войлок. Функциональным наполнителем выступил полипиррол (РРy), как один из представителей класса ЭПП. Полипиррол представлен в двух модификациях: нанотрубки и глобулы, в дальнейшем композиты на их основе обозначены как РРyNT – для нанотрубок, и РРyG – для глобул. В ходе исследования изучены особенности взаимодействия полученных композитов с ЭМИ в диапазонах частот 3.8–8.0 ГГц.

Композит войлок/РРy получен методом гетерофазного синтеза полимера в объеме текстиля, содержащего волокнистую структуру открытую и проницаемую для жидкостей и газов. В составе композита РРy находится в окисленной электропроводящей форме, и локализован на остовах волокон. Синтез проводился на базе филиала НИЦ «Курчатовский институт»-ПИЯФ-ИХС.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Радиопоглощающие и экранирующие свойства материалов изучены волноводным методом измерений. Измерения проводились отдельно в двух диапазонах частот: 3,9–5,6 ГГц и 5,6–8,0 ГГц, на сериях образцов, имеющих толщину 10 мм. Результаты измерений композитов на основе войлока/РРy в форме РРyG представлен на графиках – красным цветом, в форме РРyNT – черным.

Преимуществами волноводного метода изучения радиопоглощающих и экранирующих параметров материала являются:

- возможность получения наиболее точных характеристики материалов, не зависящие от внешних факторов;
- измерение независимых характеристик и диэлектрической и магнитной проницаемостей с использованием метода Николсона–Росса–Вейра;
- выбранные частотные диапазоны позволяют спрогнозировать характеристики композиционных поглощающих материалов с помощью методов компьютерного моделирования на большой диапазон частот.

В ходе проведения эксперимента определены параметры S_{11} , характеризующие отражение волны от поверхности образца (S_r) и параметры S_{12} , характеризующие проницаемость образца (S_t). Для измерения параметров используется векторный анализатор цепей Keysight N5232A.

Для каждого диапазона частот применялись волноводы заданного сечения: 48×24 мм для диапазона 3,9–5,6 ГГц и 35×15 мм для диапазона 5,6–8,0 ГГц.

Измерения проводились следующим образом: образец размещался в измерительной ячейке, соединенной с волноводом прямоугольного сечения и коаксиально-волновым переходом (КВП), передающим сигнал от порта векторного анализатора. Измерительная ячейка представляет из себя секцию волновода длиной 20 мм. Материал полностью заполняет секцию волновода на глубину 10 мм. Принципиальная схема измерения представлена на рис. 1.

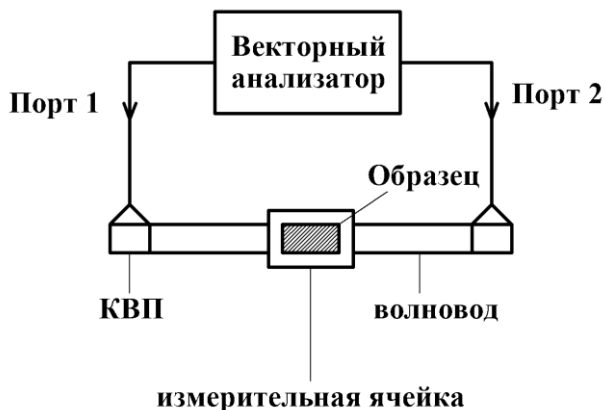


Рис. 1. Принципиальная схема измерений

Определение S параметров производилось при использовании сборки волновода и КВП для каждого из портов. Для определения параметров полного поглощения, реализуемого при двойном прохождении электромагнитной волны объёма поглотителя (K), за измерительной ячейкой устанавливался металлический экран. Материал измерения при этом, расположен непосредственно перед металлическим экраном. Измерения производятся с одного порта векторного анализатора.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На приведенных ниже рис. 2 *а,б* представлены параметры отражающей способности S_R . На рис. 3 *а,б* представлены параметры проницаемости S_T . Диапазон 3,9–5,6 ГГц представлен на графиках *а*. Диапазон 5,6–8 ГГц представлен на графиках *б*.

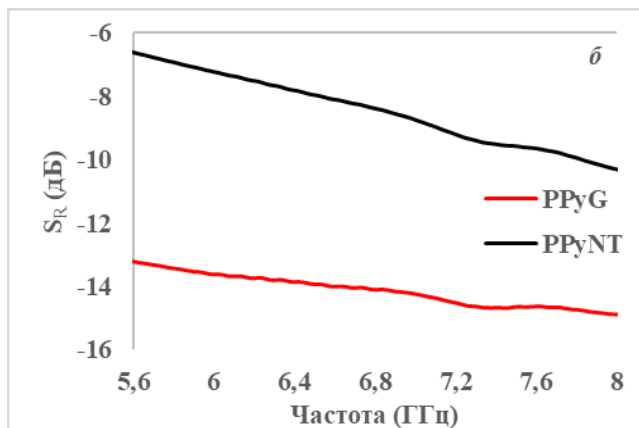
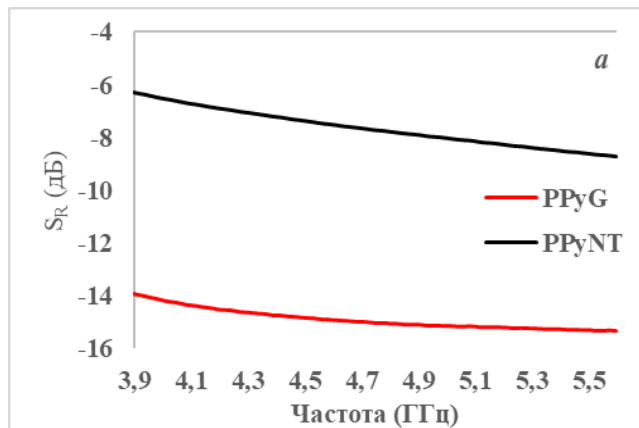


Рис. 2. Частотные зависимости параметров S_R для диапазонов 3,9–5,6 ГГц (а) и 5,6–8,0 ГГц (б).

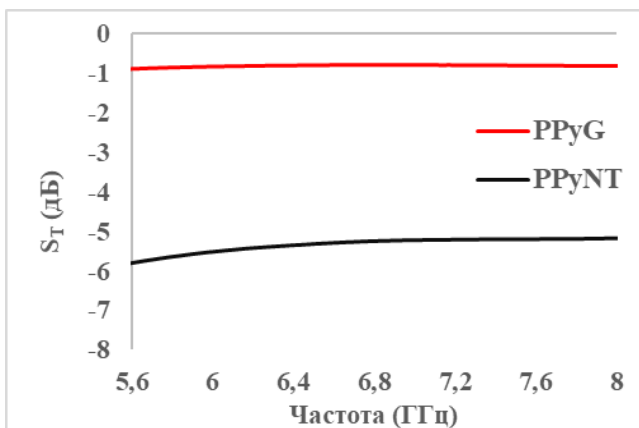
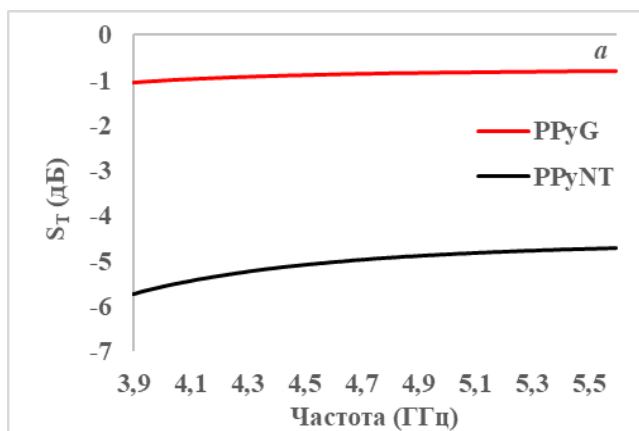


Рис. 3. Частотные зависимости параметров S_T для диапазонов 3,9–5,6 ГГц (а) и 5,6–8,0 ГГц (б)

По результатам измерений видно, что ослабление сигнала ЭМИ при прохождении сквозь образец для материалов на основе полипиррола в форме глобул находится на уровне 0,8–1 дБ, для образцов на основе полипиррола в форме нанотрубок 5–6 дБ. Для всех образцов характерно снижение вклада отражения, при увеличении частоты, что в совокупности с неизменным показателем проницаемости, говорит об увеличении вклада поглощения.

На рис. 4 а, б приведены параметры поглощения ЭМИ исследуемыми материалами (K), реализуемого при двойном прохождении электромагнитной волны объема материала. Диапазон 3,9–5,6 ГГц представлен на графике а. Диапазон 5,6–8 ГГц представлен на графике б.

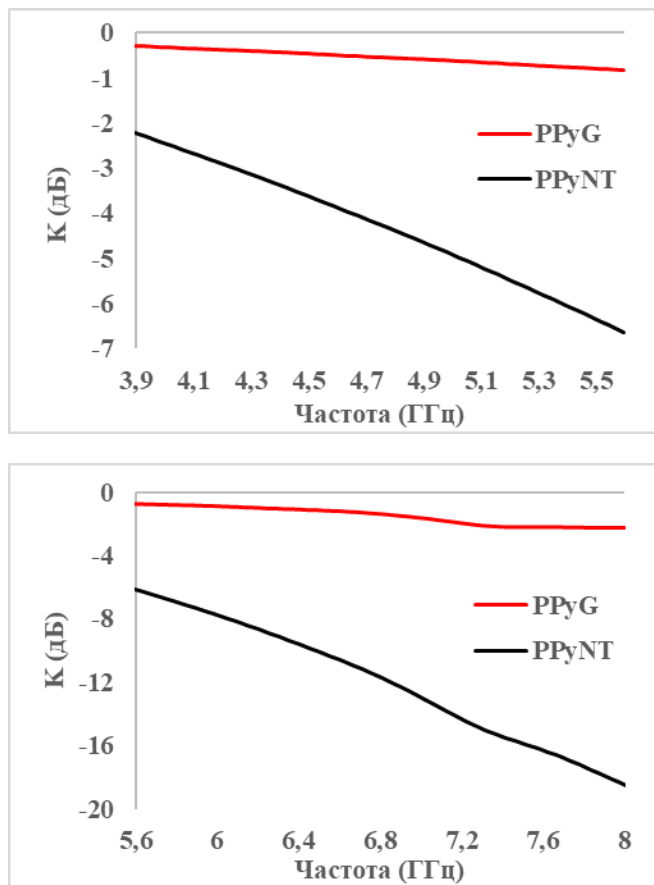


Рис. 4. Частотная зависимость параметра K для диапазонов 3,9–5,6 ГГц (а) и 5,6–8,0 ГГц (б). Глобулы PPy – красные линии, нанотрубки PPy – черные линии

Показатель поглощения демонстрирует тенденцию к увеличению с ростом частоты. Общая тенденция увеличения согласуется с полученными ранее результатами анализа отражательной способности и способности прохождения ЭМИ сквозь образцы. Материал на основе полипиррола в форме нанотрубок демонстрирует значительно больший показатель поглощения.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Волноводный метод измерений использован для анализа взаимодействия ЭМИ с композиционными материалами, полученными на основе войлока и полипиррола в виде глобул и нанотрубок. Материалы имеют низкую плотность и нетканую структуру.

Для образцов получены частотные зависимости параметров поглощения S_i и отражения S_r в двух частотных диапазонах 3,9–5,6 ГГц и 5,6–8,0 ГГц, выявляющие характер взаимодействия материалов с ЭМИ.

По показателям полного поглощения K композитный материал на основе PPy в форме нанотрубок достигает значения 6 дБ на диапазоне частот 3,9–5,6 ГГц и 18 дБ на диапазоне частот 5,6–8 ГГц. При этом видна тенденция к увеличению показателя поглощения с ростом частоты. Показано, что эффективность поглощения в значительной степени выше для материала на основе PPy в модификации нанотрубок. Доказана эффективность создания композиционных материалов на основе полипиррола как представителя класса ЭПП в качестве радиопоглощающих изделий. На основе изученного материала возможно создание текстилей для защиты человека от негативных факторов воздействия ЭМИ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает свою благодарность д.х.н Сапуриной И.Ю. и Шишову М.А., сотрудникам филиала НИЦ «Курчатовский институт»-ПИЯФ-ИХС за предоставленные материалы и сотрудничество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Paul C.R., Scully C.R., Steffka M.A. Introduction to Electromagnetic Compatibility; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2022.
- [2] Ma M. T., Kanda M., Crawford M. L., E. B. Larsen, A Review of Electromagnetic Compatibility/Interference Measurement Methodologies // Proceedings of IEEE, Vol. 73, No. 3, 1985, pp. 388–411.
- [3] Fionov A., Kraev I., Yurkov G., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-Absorbing Materials Based on Polymer Composites and Their Application to Solving the Problems of Electromagnetic Compatibility // Polymers 2022, 14, p. 3026.
- [4] American National Standards Institute (ANSI). Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300kHz to 100GHz. – American National Standards Institute, 1982.
- [5] Balzano Q., Garay O., Steel F.R., Energy deposition in simulated human operators of 800-MHz portable transmitter // IEEE Transactions on Vehicular Technology. vol. 27, no. 4, pp. 174–181, November 1978.
- [6] Latypova, A.F., Kalinin Yu. E. Analysis of promising radio-absorbing materials // Bulletin of the Voronezh State Technical University. vol. 8, No. 6, pp. 70–76, 2012.
- [7] Kumari S., Dalal J., Kumar V., Kumar A., Ohlan A. Emerging Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Interference Shielding Application // International Journal of Molecular Sciences vol. 24, 2023.
- [8] Ruiz-Perez F., López-Estrada S.M., Tolentino-Hernández R.V., Caballero-Briones F., Carbon-based radar absorbing materials: A critical review // Journal of Science: Advanced Materials and Devices, vol. 7, iss. 3, 2022.
- [9] T. Rybicki, Z. Stempien, I. Karbownik, “EMI Shielding and Absorption of Electroconductive Textiles with PANI and PPy Conductive Polymers and Numerical Model”, // Approach. Energies, vol 14, 2021.
- [10] Sapurina, I. & Shishov, Maksim & Shcherbakov, A. & Spivak (Kanageeva), Yulia & Selutin, A. Composite Textile with Electroconductive and Magnetic Properties // Polymer Science, Series B. 2024.
- [11] Sapurina I., Kazantseva N., Prokes J., Saga P., Stejskal J. Electromagnetic Radiation Shielding by Composites of Conducting Polymers and Wood // Journal of Applied Polymer Science, vol. 95, pp. 807–814. 2005.

- [12] Malere C.P.R., Donati B., Eras N., Silva V.A., Lona L.F.J. Electromagnetic evaluation of radar absorbing materials based on conducting polypyrrole and organic-inorganic nanocomposite of polypyrrole/kaolinite // *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 39, iss. 17, 2022.
- [13] Akram S., Ashraf M., Javid A., Affan-Abid H., Ahmad S., Nawab Y., Rasheed A., Xue Zh., Nosheen A. Recent advances in electromagnetic interference (EMI) shielding textile: A comprehensive review // *Synthetic Metals*, vol. 294, 2023.
- [14] Kumari S., Dalal J., Kumar A., Pal R., Chahal R., Ohlan A. Enhanced microwave absorption properties of conducting polymer@graphene composite to counteract electromagnetic radiation pollution: green EMI shielding // *RSC Advances*. vol. 14, pp. 662 – 676. 2024.
- [15] Malere C.P.R., Donati B., Eras N., Silva V.A., Lona J.L.F., Electromagnetic evaluation of radar absorbing materials based on conducting polypyrrole and organic-inorganic nanocomposite of polypyrrole/kaolinit // *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 39, iss. 17, 2022.
- [16] Kirsnytė M., Jurkūnas M., Kancleris Ž., Ragulis P., Simniškis Vareikis R., A., Abraitienė A., Požėla K., Whiteside B., Tuinea-Bobe C.L., Stirkė A. Investigation of in situ formed conductive polymer composite in adhesive matrix // *Synthetic Metals*, vol. 258, 2019.
- [17] Franchitto M., Faez R., Orlando A.J.F., Rezende M.C., Martin I.M. Electromagnetic behavior of radar absorbing materials based on conducting polymers // *Proceedings of the 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*.
- [18] Biscaro R.S., E. Nohara, Peixoto G.G., Faez R., Rezende M.C., Performance Evaluation of Conducting Polymer Paints as Radar Absorbing Materials (RAM) // *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings*, vol.1. pp. 355–358, 2003.
- [19] Мошников В.А., Спивак Ю.М., Алексеев П.А., Пермяков Н.В. Атомно-силовая микроскопия для исследования наноструктурированных материалов и приборных структур. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.
- [20] Спивак Ю.М. Атомно-молекулярный дизайн наноструктурированных материалов и наноконпозиций. Синтез, контроль технологии, свойства и применение: дис. ... док. тех. наук / Санкт-Петербургский государственный электротехнический ун-т "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург, 2022.
- [21] Атомно-силовая микроскопия наноструктур полианилина / Спивак Ю.М., Мошников В.А., Сапурина И.Ю., Казанцева Н.Е. // *Биотехносфера*, 2012, № 1(19), С. 7-12.
- [22] Combined effect of demagnetizing field and induced magnetic anisotropy on the magnetic properties of manganese–zinc ferrite composites / V. Babayan, N.E. Kazantseva, R. Moucka, I. Sapurina, Yu. M. Spivak, V.A. Moshnikov. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324. 2012. P. 161–172.