

Мараховский Михаил Алексеевич – Научное конструкторско-технологическое бюро «Пьезоприбор» Южного федерального университета; e-mail: marmisha@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79045015431; к.т.н.; начальник сектора.

Панич Александр Анатольевич – директор-главный конструктор; д.т.н.; профессор.

Marakhovskiy Mikhail Alexeevich – Scientific-Design-Technological Department "PIEZOPRIBOR", Southern Federal University; e-mail: marmisha@mail.ru; 10, Mil'chakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79045015431; cand. of eng. sc.; head of sector.

Panich Alexandr Anatol'evich – director, chief designer; dr. of eng. sc.

УДК 621.396.67

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-249-258

М.М. Мусаев, Н.Н. Кисель

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА

В антенной технике применение метаматериалов считаются перспективным для создания новых классов СВЧ-устройств, излучателей и ФАР на их основе, позволяющих оптимизировать спектральные свойства излучения ФАР и управлять параметрами их диаграмм направленности. Уменьшение размеров антенн и увеличение направленности излучения при фиксированных размерах излучателей являются одной из важных задач антенной техники. Одним из способов решения этой задачи является использование слоев метаматериала, расположенных между излучателем и подложкой. В работе рассмотрена антенная линза на основе комбинированного метаматериала, представляющего структуру из разомкнутых кольцевых резонаторов, и плоскую структуру на базе рамочных элементов. Проведены численные и экспериментальные исследования и показана эффективность использования метаматериалов в качестве подложки антенн с целью улучшения направленных свойств антенны и уменьшения габаритов антенны в области реализации отрицательных значений диэлектрической или магнитной проницаемостей метаматериала. Вне рабочей полосы частот метаматериала его присутствие не оказывает влияния на характеристики антенны. Численно и экспериментально показано, что использование метаматериалов вблизи элементарных излучателей электромагнитных волн позволяет увеличить коэффициент усиления антенны и сузить диаграмму направленности при фиксированных поперечных размерах антенны. Показано, что использование подложки из комбинированного метаматериала на основе квадратных разомкнутых кольцевых резонаторов позволяет получить увеличение коэффициента усиления симметричной крестообразной антенны на 12 дБ в области реализации отрицательных значений диэлектрической проницаемости. Таким образом, слой метаматериала можно рассматривать как аналог антенной линзы, фокусирующей излучение антенны.

Метаматериал; антенная линза; разомкнутые кольцевые резонаторы; коэффициент усиления антенны.

M.M. Musayev, N.N. Kisel

RESEARCH OF ANTENNA CHARACTERISTICS BASED ON METAMATERIAL

In the antenna technique, the use of metamaterials is considered promising for the creation of new classes of microwave devices, radiators and phased arrays based on them, which make it possible to optimize the spectral properties of phased-array radiation and control the parameters of their directional patterns. Reducing the size of antennas and increasing the directivity of radiation for fixed dimensions of radiators are one of the important tasks of antenna technology. One way to solve this problem is to use the metamaterial layers located between the emitter and the substrate. An antenna lens based on a combined metamaterial representing a structure of opening resonators and a flat structure based on frame elements is considered. Numerical and exper-

imental studies have been carried out and the efficiency of the use of metamaterials as antenna substrate has been demonstrated with the aim of improving the directional properties of the antenna and reducing the antenna dimensions in the area of realizing the negative values of the dielectric or magnetic permeabilities of the metamaterial. Outside the working frequency band of the meta-material, its presence does not affect the characteristics of the antenna. It has been shown numerically and experimentally that the use of metamaterials near elementary emitters of electromagnetic waves makes it possible to increase the antenna gain and narrow the radiation pattern for fixed transverse dimensions of the antenna. It is shown that the use of a substrate from a combined metamaterial based on square open ring resonators makes it possible to obtain an increase in the gain of a symmetrical cross-shaped antenna by 12 dB in the region of realization of negative values of the dielectric constant. Thus, the metamaterial layer can be considered as an analogue of antenna lens focusing the radiation of the antenna.

Metamaterial; antenna lens; open ring resonators; antenna gain factor.

Введение. В антенной технике применение метаматериалов считаются перспективным для создания новых классов СВЧ-устройств, излучателей и ФАР на их основе, позволяющих оптимизировать спектральные свойства излучения ФАР и управлять параметрами их диаграмм направленности. Уменьшение размеров антенн и увеличение направленности излучения при фиксированных размерах излучателей являются одной из важных задач антенной техники. Одним из способов решения этой задачи является использование слоев метаматериала, расположенных между излучателем и подложкой.

Метаматериал – композиционный материал, в виде искусственной периодической структуры с отрицательными диэлектрическими и/или магнитными проницаемостями. Такие свойства обусловлены не столько свойствами составляющих его элементов, сколько искусственно созданной периодической структурой из макроскопических элементов, обладающих произвольными размерами и формой. В работах [1–5] экспериментально показано, что на основе композитов с различными включениями возможно создание материала с отрицательными вещественными частями магнитной и диэлектрической проницаемостей. Путем выбора геометрии включений можно добиваться различных свойств материала в полосе частот.

В антенной технике метаматериалы считаются перспективными для создания новых классов СВЧ-устройств, излучателей и ФАР на их основе, позволяющих оптимизировать спектральные свойства излучения ФАР и управлять параметрами диаграмм направленности антенны.

Основные направления использования метаматериалов. Подход Николсона-Росса-Вира первоначально разработан Николсоном и Россом, позднее адаптирован Виром для автоматических анализаторов цепей для вычисления диэлектрической и магнитной проницаемости из коэффициентов прохождения и отражения. Для значений диэлектрической и магнитной проницаемостей могут наблюдаться разрывы для метаматериала, имеющего толщину, превышающую половину длины волны (рис. 1).

Эффективная диэлектрическая и магнитная постоянная вычисляются на основе коэффициентов отражения и прохождения. Нормированный волновой импеданс слоя, можно описать аналогично входному импедансу линии передачи. Z определяется уравнением [1]:

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+r^2)-t^2 e^{-2ik_0 d}}{(1-r^2)-t^2 e^{-2ik_0 d}}},$$

где d – толщина рассматриваемого слоя, $k_0 = 2\pi / \lambda$, λ – длина волны в свободном пространстве.

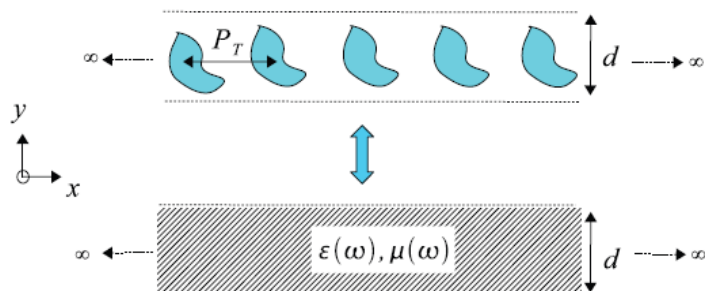


Рис. 1. Эквивалентность слоя из периодических элементов слою толщиной d с частотно-зависимыми параметрами

Реальная часть коэффициента преломления задана уравнением:

$$n' = \frac{\arctan(\text{Im}(Y) / \text{Re}(Y)) \pm m\pi}{k_0\lambda},$$

где

$$Y = e^{-ink_0d} = X \pm \sqrt{X^2 - 1},$$

$$X = \frac{e^{-ik_0d}}{2t} (1 - r^2 + t^2 e^{-2ik_0d}).$$

Мнимая часть коэффициента преломления вычисляется из формулы

$$n'' = \frac{\ln|Y|}{k_0d},$$

n'' вычисляется с использованием ограничения $n'' > 0$ для любых коэффициентов преломления материала.

Исходя из определения коэффициента преломления, а так же импеданса, получим диэлектрическую и магнитную проницаемость

$$n = \sqrt{\varepsilon(\omega)\mu(\omega)}, \quad Z = \sqrt{\mu(\omega) / \varepsilon(\omega)}$$

получим:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{n}{Z} \quad \text{и} \quad \mu(\omega) = nZ.$$

Электрофизические параметры материала определяют его свойства и реакцию на воздействие электромагнитного излучения. Диэлектрическая и/или магнитная проницаемости метаматериалов имеют отрицательные значения. Нитная проницаемости метаматериалов имеют отрицательные значения. На рис. 2 приведены частотные усредненные зависимости диэлектрической и магнитной проницаемостей слоя метаматериала.

Одно из направлений использования метаматериалов – применение их в качестве подложки микрополосковой антенны для уменьшения геометрических размеров антенны и расширения рабочего диапазона частот. Однако уменьшение размеров антенны невелико [6] (рис. 3).

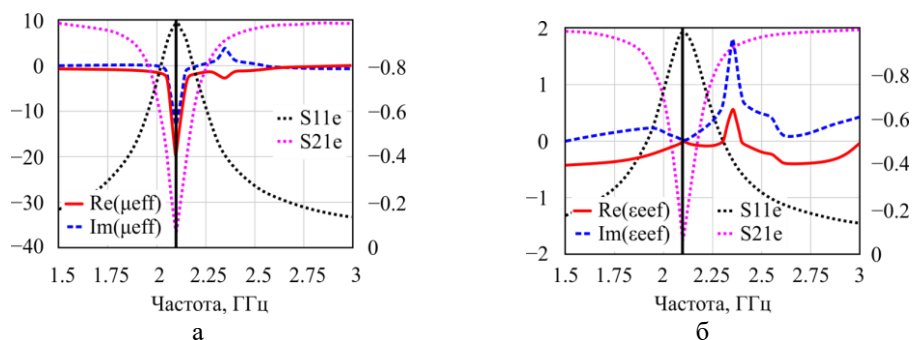


Рис. 2. Частотные зависимости усредненных диэлектрических (а) и магнитных (б) проницаемостей рамочной структуры

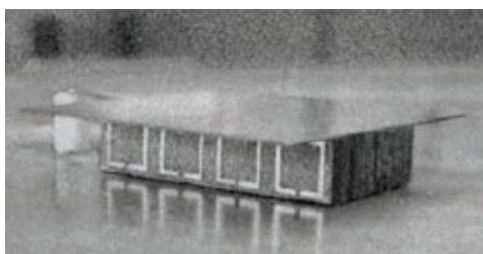


Рис. 3. Антенна с подложкой из метаматериала

В [7–11] рассматривается линза на основе кольцевых резонаторов, расположенных в виде подложки, непосредственно под излучателем рис. 4. Использование линзы позволило реализовать малогабаритную антенну в области низких частот.

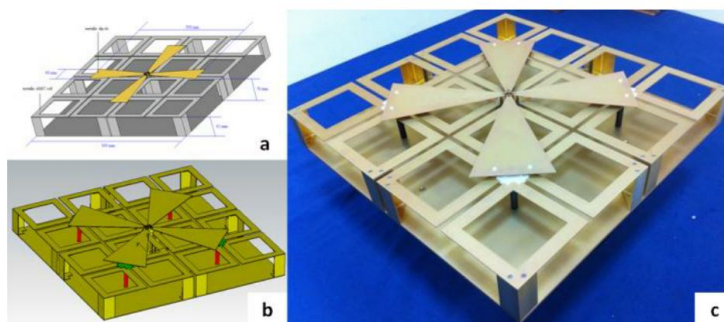


Рис. 4. Модель линзы на основе метаматериала

В работе рассмотрена возможность построения линзы антенны из метаматериала, который обладает свойствами прозрачности вне рабочего диапазона разрабатываемого устройства.

На рис. 5 представлены в сравнении диаграммы отражения полуволнового вибратора со слоем комбинированной структуры, имеющий размер $\lambda \times \lambda$. и без нее. Как видно из рисунка, на рабочей частоте метаструктура формирует отражение эквивалентное наличию металлического экрана.

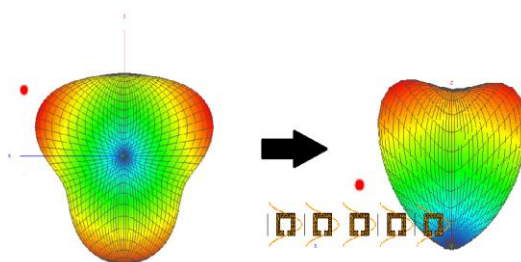


Рис. 5. Применение комбинированного экрана из метаматериала для фокусировки излучения

Обеспечивая эффект фокусировки, аналогичный металлической пластине, метаматериал удовлетворяет требованиям радиопрозрачности вне своего рабочего диапазона частот. Таким образом, возможно использование метаматериалов с целью увеличения коэффициента усиления антенны в рабочем диапазоне частот.

Линза представляет комбинированную структуру элементов, в состав которой для повышения эффективности добавлены объемные элементы. Период состоит из плоского элемента с размерами: широкая сторона 14 см, высота 3 см, толщина 0.5 см, разрыв 0.5 см; и замкнутых квадратных колец: со стороной 14 см, толщиной 1 см (рис. 6). Расположение слоя метаматериала по отношению к излучателю показано на рис. 7. Излучатель представляет собой симметричную крестообразную антенну с длиной плеча 7 см и шириной 1 см.

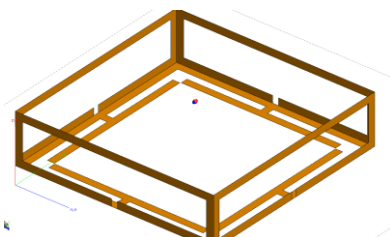


Рис. 6. Один период метаматериала для линзы

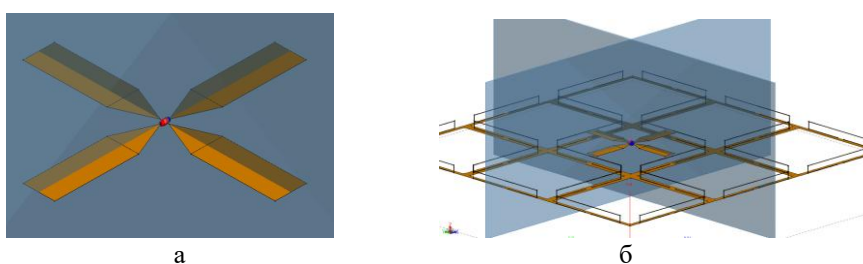


Рис. 7. Модель исследуемого излучателя с экраном и излучателя с метаматериалом

Как показали расчеты, использование подложки из комбинированного метаматериала на основе квадратных разомкнутых кольцевых резонаторов позволило получить увеличение коэффициента усиления для данного излучателя на 12 дБ (рис. 6).

На рис. 8 представлен результат модификации результирующей диаграммы направленности при применении антенной линзы на основе метаматериала на частоте 2 ГГц, соответствующей наибольшей эффективности использования слоя метаматериала. Использование метаматериала позволяет выполнить фокусировку излучения в направлении к нормали к плоскости экрана (рис. 8–9).

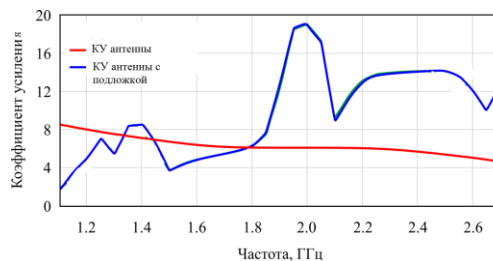


Рис. 8. Частотная характеристика коэффициента усиления антенны без метаматериала (кривая 1) и со слоем метаматериала (кривая 2)

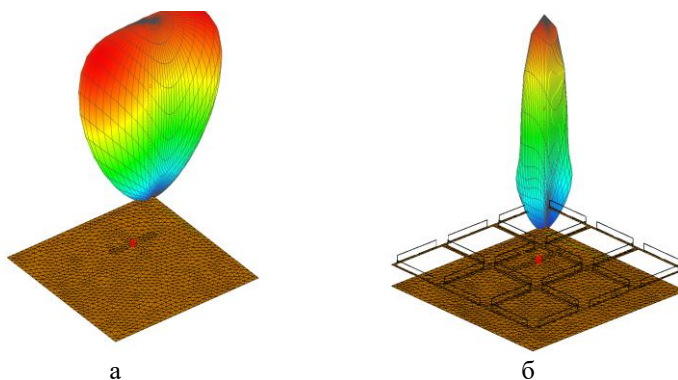


Рис. 9. Изменение ДН: а — излучатель; б — излучатель с подложкой из метаматериала

Результаты, полученные численно, были проверены экспериментально. Макет слоя метаматериала был построен на основе рамочной структуры с Т-образными включениями. Высота выступа 1 см, ширина плеча 10 см, толщина 0.6 см, макет показан на рис. 10.

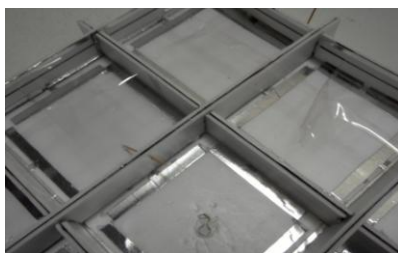


Рис. 10. Макет экрана антенной линзы

Схема эксперимента представлена на рис. 11. Анализ коэффициента усиления производился с помощью анализатора спектра Agilent. В качестве измерительной антенны использовалась рупорная антенна, с рабочим диапазоном 1–18 ГГц.

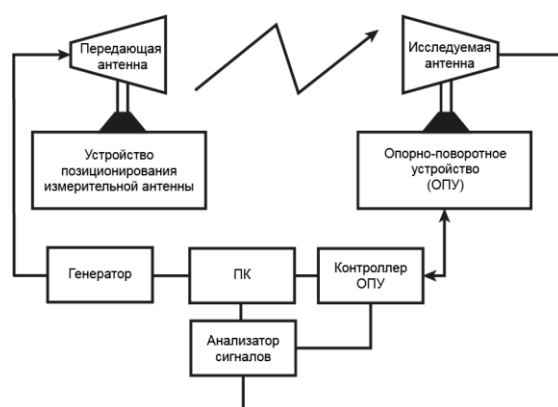


Рис. 11. Структурная схема экспериментальной установки

На рис. 12 представлены частотные зависимости коэффициента усиления излучателя с метаматериалом и без него.

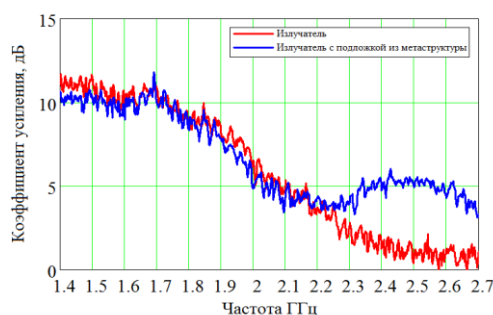


Рис. 12. Коэффициент усиления излучателя со слоем метаматериала и без него

Как видно из графиков, в частотной области реализации слоем отрицательных значение диэлектрической проницаемости наблюдается существенное увеличение коэффициента усиления антенны, в то время как в области радиопрозрачности материала его наличие не оказывает влияние на коэффициент усиления.

Заключение. Таким образом, проведены численные и экспериментальные исследования и показана эффективность использования метаматериалов в качестве подложки антенн с целью улучшения направленных свойств антенны и уменьшения габаритов антенны в области реализации отрицательных значений диэлектрической или магнитной проницаемостей метаматериала. Вне рабочей полосы частот метатериала его присутствие не оказывает влияния на характеристики антенны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 1. – С. 3-27.
2. Симовский К.Р. О материальных параметрах метаматериалов // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107, № 5. – С. 766-793.
3. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // Physical Review Letter. – 2000. – Vol. 84, No. 18. – P. 4184-4187.

4. *Shelby R.A., Smith D.R., Nemat-Nasser S.C., Shultz S.* Microwave transmission through two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial // *Applied Physics Letter*. – 2001. – Vol. 78, No. 4. – P. 489-490.
5. *Wu B.I., Wang W., Pacheco J., Chen X., Grzegorzczak T., Kong J.A., Kao P., Theophilakis P.A. and Hogan M.J.* Anisotropic Metamaterials as Antenna Substrate to Enhance Directivity // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2006. – Vol. 48 (4). – P. 680-683.
6. *Бойко С.Н., Веселого В.Г., Виноградов Е.А., Жуков А.А.* Малогабаритные антенны на основе метаматериалов (практические аспекты) // *Антенны*. – 2012. – № 12 (187). – С. 32-41.
7. *Наумова Е.В., Принц В.Я., Голод С.В., Селезнев В.А., Сейфу В.А., Кубарев В.В.* Киральные метаматериалы на основе прецизионных металл-полупроводниковых спиралей // Тезисы докладов IX Российской конференции по физике полупроводников: Полупроводники'09", Новосибирск-Томск, 28 сент.-3 окт. 2009. – С. 290.
8. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C. Schultz S.* Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 84 (18). – P. 4184.
9. *Marques R., Martin F., Sorolla M.* Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley-Blackwell, an imprint of John Wiley & Sons Ltd., 2008. – 315 p.
10. *Vendik I.B., Vendik O.G., Odit M.A.* Theory and Phenomena of Metamaterials, Metamaterial Handbook / Ed. by F. Cappolino. CRC Press, Taylor & Francis Group. – 2009. – P. 21-32.
11. *Wu B.I., Wang W., Pacheco J., Chen X., Grzegorzczak T., Kong J.A.* An study of using Metamaterials as antenna substrate to enhance gain // *Progress in Electromagnetics Research, PIER*. – 2005. – Vol. 51. – P. 295-328.
12. *Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R.* Controlling Electromagnetic Fields // *Science*. – 2006. – Vol. 312, no. 1780.
13. *Lou R. K. M., Aribi T., Ghobadi C.* Improvement of Characteristics of Microstrip Antenna Using of Metamaterial Superstrate // *International Conference on Communication Engineering*. – 2010. – P. 126-129.
14. *Garg B., Agrawal N., Sharma V., Tomar A., Dubey P.* Rectangular Microstrip Patch Antenna with Pentagonal Rings Shaped Metamaterial Cover // *International Conference on Communication System and Network Technologies IEEE*. – 2012. – P. 40-44.
15. *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 84. – P. 4184-4187.
16. *Li L.W., Li Y.N., Yeo T.S., Mosig J.R., Martin O.J.F.* An broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna // *Applied Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 96, No. 164101.
17. *Zhu J., Eleftheriades G.V.* Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications // *Electronic Letters*. – 2009. – Vol. 45, Issue 22. – P. 1104-1106.
18. *Liang J., Chiau C.C., Chen X., Parini C.G.* Printed circular disc monopole antenna for ultrawideband applications // *Electronic Letters*. – 2004. – Vol. 40, Issue 20. – P. 1246-1247.
19. *Pandeeswari R., Raghavan Dr.S., Bagde P.A., Chittipothul A.K.* An Compact Multi-Split Ring Resonator Loaded Antenna // *International Conference on Communication and Signal Processing, IEEE*. – 2013. – P. 807-810.
20. *Dwivedi S., Mishra V., Kosta Y.* Metamaterial inspired patch antenna miniaturization technique for satellite // *International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, IEEE*, 2012.
21. *Ha J., Kwon K., Lee Y., Choi J.* Hybrid Mode Wideband Patch Antenna Loaded With a Planar Metamaterial Unit Cell // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2012. – Vol. 60, No. 2. – P. 1143-1147.
22. *Cao W., Xiang Y., Zhang B., Liu A., Yu T., Guo D.* An Low-Cost Compact Patch Antenna With Beam Steering Based on CSRR-Loaded Ground // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2011. – Vol. 10. – P. 1520-1523.
23. *Bilotti F., Alù A., Vegni L.* Design of Miniaturized Metamaterial Patch Antennas With μ Negative Loading // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2008. – Vol. 56, No. 6. – P. 1640- 1647.
24. *Antoniades M.A., Eleftheriades G.V.* An Broadband Dual-Mode Moopole Antenna using NRI-TL Metamaterial Loading // *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*. – 2009. – Vol. 8. – P. 258-261.

25. Palandoken M., Grede A., Henke H. Broadband Microstrip Antenna with Left-Handed Metamaterials // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2009. – Vol. 57, No. 2. – P. 331-338.
26. Wang L., Wang L., Li J. L.-W. An Series-Fed Metamaterial Microstrip Antenna Array of Broadband and High-Gain // *IWEM Proceedings, IEEE*. – 2012.

REFERENCES

1. Vendik I.B., Vendik O.G. Metamaterialy i ikh primeneniye v tekhnike sverkhvysokikh chastot [Metamaterials and their applications in engineering ultra-high frequencies], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2013, Vol. 83, Issue 1, pp. 3-27.
2. Simovskiy K.R. O material'nykh parametrakh metamaterialov [On material parameters of metamaterials], *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 2009, Vol. 107, No. 5, pp. 766-793.
3. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Physical Review Letter*, 2000, Vol. 84, No. 18, pp. 4184-4187.
4. Shelby R.A., Smith D.R., Nemat-Nasser S.C., Shultz S. Microwave transmission through two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial, *Applied Physics Letter*, 2001, Vol. 78, No. 4, pp. 489-490.
5. Wu B.I., Wang W., Pacheco J., Chen X., Grzegorzczak T., Kong J.A., Kao P., Theophilakes P.A and Hogan M.J. Anisotropic Metamaterials as Antenna Substrate to Enhance Directivity, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, Vol. 48 (4), pp. 680-683.
6. Boyko S.N., Veselago V.G., Vinogradov E.A., Zhukov A.A. Malogabaritnye anteny na osnove metamaterialov (prakticheskie aspekty) [Small antennas based on metamaterials (practical aspects)], *Antenny* [Antenna], 2012, No. 12 (187), pp. 32-41.
7. Naumova E.V., Prints V.Ya, Golod S.V., Seleznev V.A., Seyfi V.A., Kubarev V.V. Kiral'nye metamaterialy na osnove pretsizionnykh metall-poluprovodnikovykh spiraley [Chiral metamaterials based on precise metal-semiconductor helices], *Tezisy dokladov IX Rossiyskaya konferentsiya po fizike poluprovodnikov: Poluprovodniki'09"*, Novosibirsk-Tomsk, 28 sent.-3 okt. 2009 [Abstracts of IX Russian conference on semiconductor physics: Semiconductors'09", Novosibirsk-Tomsk, 28 Sept.-3 Oct. 2009], pp. 290.
8. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C. Schultz S. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Physical Review Letters*, 2000, Vol. 84 (18), pp. 4184.
9. Marques R., Martin F., Sorolla M. Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley-Blackwell, an imprint of John Wiley & Sons Ltd., 2008, 315 p.
10. Vendik I.B., Vendik O.G., Odit M.A. Theory and Phenomena of Metamaterials, *Metamaterial Handbook*, Ed. by F. Cappolino. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009, pp. 21-32.
11. Wu B.I., Wang W., Pacheco J., Chen X., Grzegorzczak T., Kong J.A. An study of using Metamaterials as antenna substrate to enhance gain, *Progress in Electromagnetics Research, PIER*, 2005, Vol. 51, pp. 295-328.
12. Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. Controlling Electromagnetic Fields, *Science*, 2006, Vol. 312, No. 1780.
13. Lou R. K. M., Aribi T., Ghobadi C. Improvement of Characteristics of Microstrip Antenna Using of Metamaterial Superstrate, *International Conference on Communication Engineering*, 2010, pp. 126-129.
14. Garg B., Agrawal N., Sharma V., Tomar A., Dubey P. Rectangular Microstrip Patch Antenna with Pentagonal Rings Shaped Metamaterial Cover, *International Conference on Communication System and Network Technologies IEEE*, 2012, pp. 40-44.
15. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett.*, 2000, Vol. 84, pp. 4184-4187.
16. Li L.W., Li Y.N., Yeo T.S., Mosig J.R., Martin O.J.F. An broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna, *Applied Phys. Lett.*, 2010, Vol. 96, No. 164101.
17. Zhu J., Eleftheriades G.V. Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications, *Electronic Letters*, 2009, Vol. 45, Issue 22, pp. 1104-1106.

18. Liang J., Chiau C.C., Chen X., Parini C.G. Printed circular disc monopole antenna for ultrawideband applications, *Electronic Letters*, 2004, Vol. 40, Issue 20, pp. 1246-1247.
19. Pandeewari R., Raghavan Dr.S., Bagde P.A., Chittipothul A.K. An Compact Multi-Split Ring Resonator Loaded Antenna, *International Conference on Communication and Signal Processing, IEEE*, 2013, pp. 807-810.
20. Dwivedi S., Mishra V., Kosta Y. Metamaterial inspired patch antenna miniaturization technique for satellite, *International Conference on Emerging Technology Trends in Electronics, Communication and Networking, IEEE*, 2012.
21. Ha J., Kwon K., Lee Y., Choi J. Hybrid Mode Wideband Patch Antenna Loaded With a Planar Metamaterial Unit Cell, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, Vol. 60, No. 2, pp. 1143-1147.
22. Cao W., Xiang Y., Zhang B., Liu A., Yu T., Guo D. An Low-Cost Compact Patch Antenna With Beam Steering Based on CSRR-Loaded Ground, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, Vol. 10, pp. 1520-1523.
23. Bilotti F., Alù A., Vegni L. Design of Miniaturized Metamaterial Patch Antennas With muNegative Loading, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, Vol. 56, No. 6. – P. 1640- 1647.
24. Antoniadou M.A., Eleftheriades G.V. An Broadband Dual-Mode Monopole Antenna using NRI-TL Metamaterial Loading, *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, 2009, Vol. 8, pp. 258-261.
25. Palandoken M., Grede A., Henke H. Broadband Microstrip Antenna with Left-Handed Metamaterials, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, Vol. 57, No. 2, pp. 331-338.
26. Wang L., Wang L., Li J. L.-W. An Series-Fed Metamaterial Microstrip Antenna Array of Broadband and High-Gain, *IWEM Proceedings, IEEE*, 2012.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.М. Макаров.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; тел.: +78634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Мусаев Максуд Мурад Оглы – Федеральное государственное предприятие «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»; e-mail: Vargallow@gmail.com; 344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130; тел.: +78634371634.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: nnkisel@sfedu.ru; 1, Ehngel'sa street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

Musayev Maksud Murad Ogly – Federal State Institution "Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication"; e-mail: Vargallow@gmail.com; 130, Nansena street, Rostov-on-Don, 347928, Russia; phone: +78634371634.

УДК 535.37:546.65

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-258-265

У.А. Марьяна, В.А. Воробьев, А.П. Марьян

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СИСТЕМЫ $\text{CaSnO}_3:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИСТОЧНИКОМ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

Синтезированы серии опытных образцов люминофора на основе станната кальция, активированного тремя ионами редкоземельных элементов Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} . Описаны основные методы исследования экспериментальных образцов. Полученные соединения имеют орторомбическую кристаллическую решетку, родственную минералу «перовскит». Средний размер кристаллитов составил 32,9 мкм. При возбуждении порошков лазерным диодом с длиной волны 960 нм обнаружена люминесценция в видимой и ИК-областях спектра. Исследована концентрационная зависимость интенсивности люминесценции исследуемой системы в полосах 994,