

Р.В.Петров, М.И.Бичурин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЗЫ НА МАТЕРИАЛЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

*Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого*

Properties of an ideal lens on the material with negative refraction coefficient (LHM) in the microwave frequency range from 1 to 18 GHz are investigated. The broadband system of the focusing measurement was used for measuring the microwave frequency radiation passing through LHM sample. Panoramic measurements of the electromagnetic field distribution after passing through LHM lens have been conducted. The ideal LHM lens design with the reflection coefficient of 1 and the amplification coefficient of ~ 6 dB at the frequency of 11.25 GHz was elaborated.

### 1. Введение

В современной радиотехнике используются различные материалы, на основе которых могут быть разработаны принципиально новые устройства. Одним из таких материалов является материал с отрицательной магнитной и диэлектрической проницаемостями — «left-handed material» (LHM), предсказанный В.Г.Веселаго [1]. В этой пионерской работе было теоретически показано, что с помощью изготовленной из LHM линзы (в том числе прямоугольной формы) с коэффициентом преломления  $-1$  возможно сфокусировать излучение как от ближнего, так и от дальнего электромагнитного источника. Такой материал должен обладать одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями. При этом он имеет необычные свойства при прохождении через него электромагнитных волн. Например, в таких материалах возможен аномальный эффект Доплера, генерация обратного Черенковского излучения, обратный эффект Фарадея. В [2] показано, что достаточно простые металлические структуры из резонаторных элементов, сформированные в решетку, могут обладать свойствами LHM в СВЧ диапазоне. В [3] предложен и исследован материал, состоящий из периодической решетки кольцевых резонаторов и диполей. Такие кольцевые резонаторы получили название «split ring resonators» (SRR). В [4] доказано, что линза из LHM обладает идеальными свойствами, а ограничения, накладываемые волновым характером СВЧ поля при фокусировке обычной линзой, на линзы из LHM не распространяются. Идеальная линза из LHM не только собирает все прошедшие лучи в фокус, но также восстанавливает амплитуду и фазу преломленной волны в точке фокуса [5]. В настоящее время опубликовано большое число теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию LHM. Доказана возможность получения малых потерь в линзах для диапазона СВЧ [6], где измеренные потери в структуре LHM составили  $-1,1$  дБ.

Общая формула для вычисления коэффициента преломления имеет вид

$$n = \frac{\sin\varphi}{\sin\psi} = \sqrt{\frac{\epsilon_2\mu_2}{\epsilon_1\mu_1}}. \quad (1)$$

Согласно расчетам, опубликованным в [1], коэффициент преломления в случае одновременно отрицательных диэлектрической и магнитной проницаемостей остается положительным, но когда вторая среда левосторонняя (т.е. имеющая отрицательные проницаемости), преломленный луч лежит с противоположной стороны от оси распространения, по сравнению со случаем правосторонней среды. Это подтверждено результатами [7], где представлены экспериментальные данные распространения СВЧ поля в LHM структуре.

Цель данной работы заключается в исследовании эффекта фокусировки СВЧ энергии после прохождения излучения через линзу ЛНМ или, другими словами, экспериментальное исследование свойств линзы на основе ЛНМ.

### Исследование линзы на материале с отрицательным коэффициентом преломления

Рассмотрим теоретические положения эксперимента. В соответствии с предложением [1] проанализируем прохождение потока СВЧ энергии через прямоугольный образец ЛНМ. Излучение из точки А проходит через линзу и вместо того, чтобы рассеяться, как в обычном случае, фокусируется в точке В.

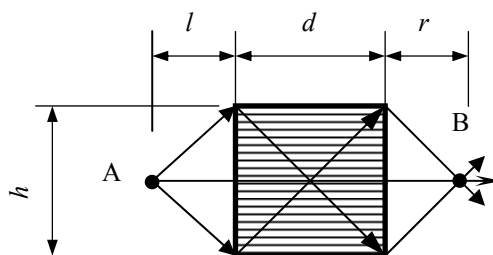


Рис. 1. Модель ЛНМ линзы. А — источник излучения, В — фокус линзы,  $h$  — ширина образца,  $d$  — длина образца,  $r$  — фокусное расстояние,  $l$  — расстояние от источника излучения до линзы

Коэффициент преломления в этом случае может быть вычислен по формуле

$$n = \sqrt{\frac{1 + \frac{h^2}{4d^2} \left(1 + \frac{r}{l}\right)^2}{1 + \frac{h^2}{4l^2}}}. \quad (2)$$

На рис.2 приведена номограмма, показывающая зависимость фокусного расстояния от коэффициента преломления среды и расстояния между линзой и источником излучения.

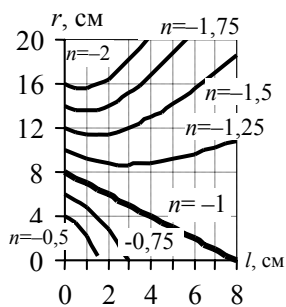


Рис.2. Зависимость фокуса линзы от  $n$  и  $l$

В общем случае коэффициент усиления линзы (по аналогии с антеннами) будет зависеть от эффективной поверхности раскрытия, или ширины линзы. Чем больше ширина линзы, тем больше коэффициент усиления линзы. В случае увеличения площади линзы коэффициент усиления увеличится пропорционально.

Для изучения свойств ЛНМ и измерения характеристик материала и линзы можно использовать предложенный в [1] теоретический подход, проводя измерения распределения СВЧ поля после ЛНМ линзы.

Для измерения свойств ЛНМ и проверки приведенных формул были проведены измерения в диапазоне СВЧ от 1 до 18 ГГц. Для проведения измерений использовался измеритель КСВН панорамный Р2-83 (0,1÷18 ГГц). Согласно рекомендациям [3] была создана ЛНМ структура, резонансная частота которой находилась в районе 7,6 ГГц. Свойства ЛНМ наблюдались в диапазоне от 8 до 18 ГГц. ЛНМ структура представляла собой решетку из рядов металлических SRR и полуволновых диполей, расположенных с противоположных сторон диэлектрического носителя. Геометрические размеры ячейки ЛНМ приведены на рис.3а, размер ячейки  $2 \times 2 \times 2$  см. ЛНМ линза представляла собой параллелепипед размером  $6 \times 8 \times 8$  см, состоящий из четырех прямоугольных плат (рис.3б).

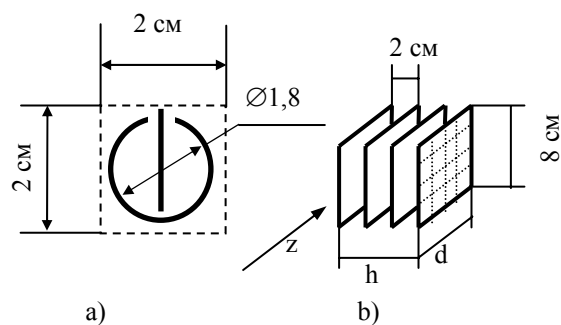


Рис.3. Геометрические размеры ячейки и линзы LHM: а) — ячейка LHM, б) — линза LHM

LHM линза подвергалась облучению во фронтальной плоскости и в профиль. В подтверждение [5] малые потери были обнаружены при профильном облучении (до 1 дБ), а большие (более 30 дБ) — при фронтальном. Схема измерительной установки приведена на рис.4.

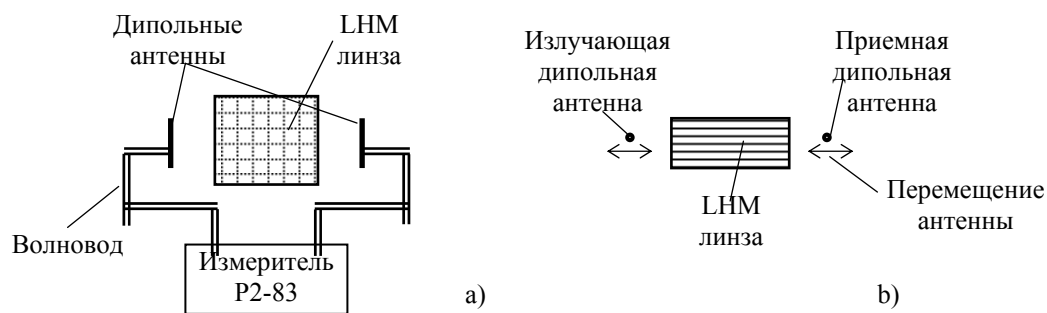


Рис.4. Схема измерительной установки: а) общая схема, б) вид сверху на LHM линзу

В качестве излучающего источника и приемного устройства использовались рупорные и дипольные антенны. Рис.5 показывает сравнение затухания СВЧ поля, полученного теоретически и экспериментально для LHM образца в диапазоне частот от 4 до 12 ГГц.

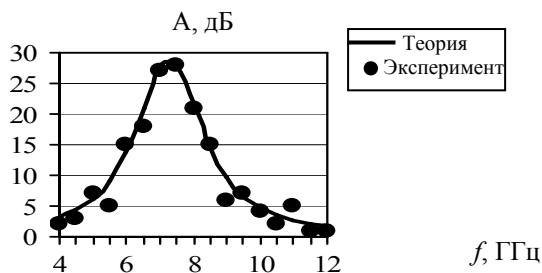


Рис.5. Затухание в образце LHM в диапазоне частот от 4 до 12 ГГц

Коэффициент преломления для LHM вычисляется по формуле (1) с магнитной проницаемостью

$$\mu' = 1 + \frac{T_m^2 \cdot (\omega_{m0} - \omega) \cdot \omega_{mp}}{(\omega_{m0} - \omega)^2 \cdot T_m^2 + 1}, \quad (3)$$

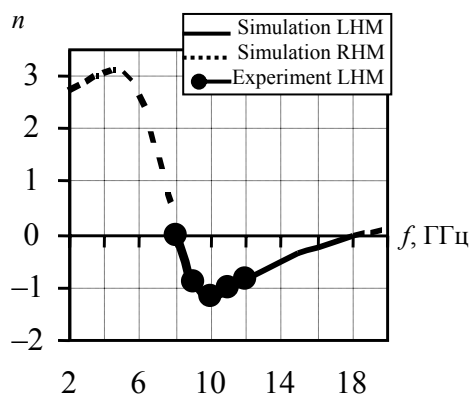


Рис.6. Частотная зависимость коэффициента преломления линзы

преломления, вычисленные с помощью формул (3) и (4), представлены на рис.6. При расчетах использовались следующие параметры:  $f_{m0} = 7,6$  ГГц;  $f_{mp} = 11,8$  ГГц;  $T_m = 0,046$ ;  $f_{e0} = 7$  ГГц;  $f_{ep} = 11,8$  ГГц;  $T_e = 0,14$ . Область от 8 до 18 ГГц на рис.6 — это диапазон частот, на которых наблюдаются свойства LHM, в других областях материал ведет себя, как «right-handed material» (RHM), и не обладает особыми свойствами.

где по аналогии с [8]  $\omega_{m0}$  — резонансная частота SRR решетки;  $\omega_{mp}$  — «магнитная плазменная частота»;  $T_m$  — время релаксации в магнитной подрешетке;  $\omega$  — рабочая частота. Формула диэлектрической проницаемости для решетки диполей имеет подобный вид:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{T_e^2 \cdot (\omega_{e0} - \omega) \cdot \omega_{ep}}{(\omega_{e0} - \omega)^2 \cdot T_e^2 + 1}, \quad (4)$$

где,  $\omega_{e0}$  — резонансная частота решетки из диполей;  $\omega_{ep}$  — «электрическая плазменная частота»;  $T_e$  — время релаксации в электрической подрешетке.

Экспериментальные и теоретические данные частотной зависимости коэффициента пре-

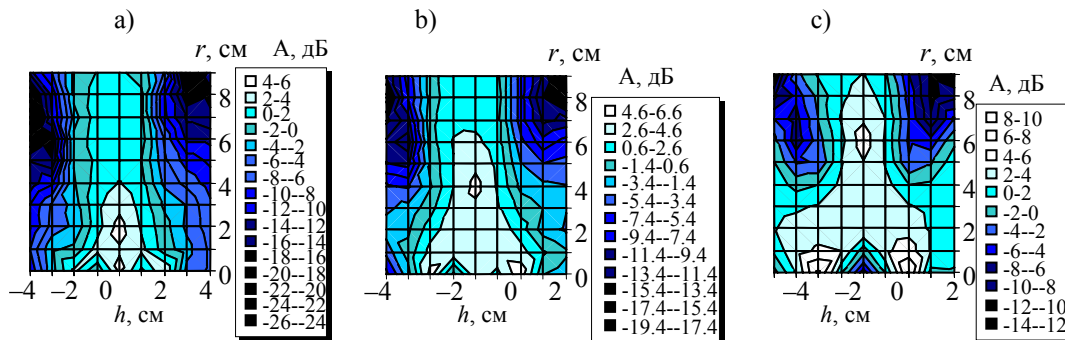


Рис.7. Распределение СВЧ поля в области фокусировки (A — вносимое ослабление). а)  $l = 6$  см,  $r = 2$  см; б)  $l = 4$  см,  $r = 4$  см; в)  $l = 2$  см,  $r = 6$  см

Были проведены панорамные измерения распределения электромагнитного поля СВЧ после прохождения через линзу LHM. Линза представляла собой параллелепипед с геометрическими размерами, приведенными на рис.3. Были изучены зависимости фокусировки при различных индексах  $n$  и расстояниях от источника излучения. На рис.7 показаны изображения фокусировок при  $n = -1$  и расстояниях от излучателя до линзы, равных 2,4,6 см. Изображения позволяют судить о распределении поля после LHM линзы. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными, что позволяет нам в дальнейшем проводить численные оценки геометрии линзы. Фокус локализован в малой области пространства и четко выражен. Коэффициент усиления линзы в экспериментах достигал 6 дБ.

### Заключение

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- использование LHM структуры возможно в ограниченном диапазоне частот;
- к линзе на основе LHM применимы свойства линейной оптики;
- расчет фокусного расстояния для линзы из LHM возможен по приведенным формулам;

— получена конструкция линзы на основе ЛНМ с индексом  $n = -1$ , коэффициент усиления которой равен  $\sim 6$  дБ на частоте 11,25 ГГц.

На основе полученных данных могут быть разработаны принципиально новые устройства СВЧ, в том числе предложенные в статье [9]: линзы, фазовращатели, волноводы, а также могут быть реализованы поглощающие СВЧ энергию покрытия.

---

1. Veselago V.G. // Soviet Physics uspekhi. 1968. V.10. №4. P.509-514.
2. Pendry J.B., Holden A., Stewart W., and Youngs I. // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol.76. №25. P.4773-4776.
3. Smith D.R., Padilla W., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., and Schultz S. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol.84. №18. P.4184-4187.
4. Pendry J.B. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol.85. №25. P.3966-3969.
5. Pendry J.B. and O'Brien S. // J. Phys. Very-low-frequency magnetic plasma. 2002. Condens. Matter 14. P.7409-7416.
6. Li Kin, McLean S.J., Greigor R.B., Parazzoli C.G., and Tanielian M.H. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol.82. №15. P.2535-2537.
7. Shelby R.A., Smith D.R., Schultz S. // Science. 2001. Vol.292. P.77-79.
8. Shelby R.A., Smith D.R., Nemat-Nasser S.C., and Shultz S. // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol.78. №4. P.489-491.
9. Bichurin M.I., Tatarenko A.S., Srinivasan G., and Mantese J.V. // Magnetoelectric Interaction Phenomena in Crystals. NATO Science Series II. Vol. 164. / Eds. M.Fiebig, V.V.Eremenko, and I.E.Chupis. L.: Kluwer Academic Publishers, 2004. P.81-86.