

**Резонансное рассеяние электромагнитных волн ГГц-диапазона частот  
линейной структурой из двух диэлектрических колец  
на магнитной дипольной моде***В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк*

*Экспериментально исследовано резонансное рассеяние на основной магнитной моде линейной структурой из двух диэлектрических колец, ориентированных вдоль волнового вектора падающей волны и возбуждаемых продольно падающей линейно поляризованной электромагнитной волной ГГц диапазона частот. В спектре рассеяния отраженной волны происходит расщепление резонансной частоты и существенно увеличиваются амплитуды обоих пиков по сравнению с амплитудой для одиночного кольца в ближней зоне. В прошедшем сигнале расщепление резонансной частоты нет, амплитуда прошедшего сигнала в дальней зоне существенно увеличивается по сравнению с одиночным кольцом.*

*Ключевые слова:* метаматериалы, диэлектрический магнитный диполь, отрицательный магнитный отклик, диэлектрическое кольцо, диэлектрическая структура, плоская электромагнитная волна, резонанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-75-81

**Печеркин Владимир Яковлевич**, с.н.с., к.ф.-м.н.  
E-mail: vpecherkin@yandex.ru

**Василяк Леонид Михайлович**, гл.н.с., д.ф.-м.н.  
Объединенный институт высоких температур РАН,  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2022 г.

© Печеркин В. Я., Василяк Л. М., 2022

*Работа выполнена при финансовой поддержке  
Министерства науки и высшего образования РФ  
(соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785  
от 23 сентября 2020 г.).*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Veselago V. G. // Phys. Usp. 2011. Vol. 54. № 11. P. 1161.
2. Vendik I. B., Vendik O. G. // Tech. Phys. 2013. Vol. 58. P. 1.
3. Zhao Q., Du B., Kang L., Zhao H., Xie Q., Li B., Zhang X., Zhou J., Li L., Meng Y. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. № 5. P. 051106.
4. Wang Z. B., Luk'yanchuk B. S., Hong M. H., Lin Y., Chong T. C. // Phys. Rev B. 2004. Vol. 70. P. 035418.
5. Bashevoy M. V., Fedotov V. A., Zheludev N. I. // Opt. Express. 2005. Vol. 13. P. 8372.

6. Luk'yanchuk B. S., Ternovsky V. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73. P. 235432.

7. Verplanken M., Van-Bladel J. // IEEE Trans. Microwave Theory Technol. 1976. № 24. P. 108.

8. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Fu Y. H., Zhang J., Luk'yanchuk B. // Sci. Rep. 2012. Vol. 2. P. 57.

9. Evlyukhin A. B., Reinhardt C., Seidel A., Luk'yanchuk B., Chichkov B. N. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 045404.

10. Garcia-Etxarri A., Gómez-Medina R., Froufe-Pérez L. S., López C., Chantada L., Scheffold F., Aizpurua J., Nieto-Vesperinas M., Sáenz J. J. // Opt. Express. 2011. Vol. 19. P. 4815.

11. Evlyukhin A. B., Novikov S. M., Zywiets U., Eriksen R. L., Reinhardt C., Bozhevolnyi S. I., Chichkov B. N. // Nano Lett. 2012. № 12. P. 3749.

12. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Domínguez R., Fedyanin A. A. // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. P. 23453.

13. Pozar D. M. Microwave Engineering. – USA. Hoboken. John Wiley & Sons, 2012.

14. Yang Y., Kravchenko I., Briggs D., Valentine J. // Nat. Commun. 2014. Vol. 5. P. 5753.

15. Bukharin M. M., Pecherkin V. Y., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., Luk'yanchuk B. // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 7997.

16. Krasnok A. E., Maksymov I. S., Denisyuk A. I., Belov P. A., Miroshnichenko A. E., Simovskii C. R.,

Kivshar Yu. S. // Phys. Usp. 2013. Vol. 56. № 6. P. 539.

17. Paniagua-Dominguez R., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. Control of scattering by isolated dielectric nanoantennas. – UK. Woodhead Publishing, 2020.

18. Paniagua-Dominguez R., Feng Yu. Ye., Miroshnichenko A. E., Krivitsky L. A., Hsing F. Y., Valuckas V., Gonzaga L., Toh Y. T., Yew Seng K. A., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. I. // Nat. Comm. 2016. Vol. 7. P. 10362.

19. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Fortov V. E. // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 2180.

20. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Vázquez L., Fortov V. E. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 475001.

21. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Fortov V. E. // Phys. Usp. 2018. Vol. 61. № 7. P. 698.

22. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L., Vázquez L., Vetchinin S. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2021. Vol. 54. P. 075004.

23. Shvartsburg A. B., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Alybin K. V., Volpyn O. D., Obod Yu. A., Pecherkin V. Ya., Privalov P. A., Churikov D. V. // Optics and Spectroscopy. 2021. Vol. 129. № 2. P. 252.

24. Печеркин В. Я., Шварцбург А. Б., Васильяк Л. М., Ветчинин С. П., Костюченко Т. С., Панов В. А. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 3. С. 191.

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

## Resonant scattering of GHz electromagnetic waves by a linear structure of two dielectric rings on a magnetic dipole mode

V. Ya. Pecherkin and L. M. Vasilyak

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences

Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Received September 27, 2022

**Experimental studies of resonance scattering on the main magnetic mode in a dielectric linear structure consisting of two rings oriented along the wave vector of the incident wave and excited by longitudinally incident linearly polarized microwaves have been performed. In the scattering spectrum of the reflected wave, the resonant frequency splits and the amplitudes of both peaks increase significantly compared to the amplitude for a single ring in the near zone. There is no splitting of the resonant frequency in the transmitted signal, the amplitude of the transmitted signal in the far zone increases significantly compared to a single ring.**

**Keywords:** metamaterials, dielectric magnetic dipole, negative magnetic response, dielectric ring, dielectric structure, plane electromagnetic wave, resonance.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-75-81

### REFERENCES

1. V. G. Veselago, Phys. Usp. **54** (11), 1161 (2011).
2. I. B. endik and O. G. Vendik, Tech. Phys. **58**, 1 (2013).
3. Q. Zhao, B. Du, L. Kang, H. Zhao, Q. Xie, B. Li, X. Zhang, J. Zhou, L. Li, and Y. Meng, Appl. Phys. Lett. **92**, 051106 (2008).
4. Z. B. Wang, B. S. Luk'yanchuk, M. H. Hong, Y. Lin, and T. C. Chong, Phys. Rev. B. **70**, 035418 (2004).
5. M. V. Bashevoy, V. A. Fedotov, and N. I. Zheludev, Opt. Express **13**, 8372 (2005).
6. B. S. Luk'yanchuk and V. Ternovsky, Phys. Rev. B. **73**, 235432 (2006).
7. M. Verplanken and J. Van-Bladel, IEEE Trans. Microwave Theory Technol. **24**, 108 (1976).
8. A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, Y. H. Fu, J. Zhang, and B. Luk'yanchuk, Sci. Rep. **2**, 57 (2012).

9. A. B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel, B. Luk'yanchuk, and B. N. Chichkov, *Phys. Rev. B* **82**, 045404 (2010).
10. A. Garcia-Etxarri, R. Gómez-Medina, L. S. Froufe-Pérez, C. López, L. Chantada, F. Scheffold, J. Aizpurua, M. Nieto-Vesperinas, and J. J. Sáenz, *Opt. Express* **19**, 4815 (2011).
11. A. B. Evlyukhin, S. M. Novikov, U. Zywiets, R. L. Eriksen, C. Reinhardt, S. I. Bozhevolnyi, and B. N. Chichkov, *Nano Lett.* **12**, 3749 (2012).
12. B. Luk'yanchuk, L. M. Vasilyak, V. Y. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. E. Fortov, Z. B. Wang, R. Paniagua-Domínguez, and A. A. Fedyanin, *Sci. Rep.* **11**, 23453 (2021).
13. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. (John Wiley & Sons, USA, Hoboken, 2012).
14. Y. Yang, I. Kravchenko, D. Briggs, and J. Valentine, *Nat. Commun.* **5**, 5753 (2014).
15. M. M. Bukharin, V. Y. Pecherkin, A. K. Ospanova, V. B. Il'in, L. M. Vasilyak, A. A. Basharin, and B. Luk'yanchuk, *Sci. Rep.* **12**, 7997 (2022).
16. A. E. Krasnok, I. S. Maksymov, A. I. Denisyuk, P. A. Belov, A. E. Miroschnichenko, C. R. Simovskii, and Yu. S. Kivshar, *Phys. Usp.* **56** (6), 539 (2013).
17. R. Paniagua-Domínguez, B. Lukyanchuk, and A. Kuznetsov, *Control of scattering by isolated dielectric nanoantennas*, (Woodhead Publishing, UK, 2020).
18. R. Paniagua-Domínguez, Yu. Ye. Feng, A. E. Miroschnichenko, L. A. Krivitsky, F. Y. Hsing, V. Valuckas, L. Gonzaga, Y. T. Toh, K. A. Yew Seng, B. Luk'yanchuk, and A. I. Kuznetsov, *Nat. Comm.* **7**, 10362 (2016).
19. A. B. Shvartsburg, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, and V. E. Fortov, *Sci. Rep.* **7**, 2180 (2017).
20. A. Shvartsburg, V. Pecherkin, S. Jiménez, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, L. Vázquez, and V. E. Fortov, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **51**, 475001 (2018).
21. A. B. Shvartsburg, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, and V. E. Fortov, *Phys. Usp.* **61** (7), 698 (2018).
22. A. Shvartsburg, V. Pecherkin, S. Jiménez, L. Vasilyak, L. Vázquez, and S. Vetchinin, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **54**, 075004 (2021).
23. A. B. Shvartsburg, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, K. V. Alybin, O. D. Volpian, Yu. A. Obod, V. Ya. Pecherkin, P. A. Privalov, and D. V. Churikov, *Optics and Spectroscopy* **129** (2), 252 (2021).
24. V. Ya. Pecherkin, A. B. Shvartsburg, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, T. S. Kostyuchenko, and V. A. Panov, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (5), 191 (2018).