

УДК 537.86; 621.37

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДВУСЛОЙНЫМИ ПЛОСКО-КИРАЛЬНЫМИ СТРУКТУРАМИ. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**А. А. КИРИЛЕНКО^{1,3}, С. А. СТЕШЕНКО^{1,3}, В. Н. ДЕРКАЧ¹, С. А. ПРИКОЛОТИН¹, Д. Ю. КУЛИК¹, С. Л. ПРОСВИРНИН^{2,3}, Л. П. МОСЬПАН¹**¹*Институт радиофизики и электроники Национальной Академии наук Украины, Украина, Харьков, 61085, ул. Проскуры 12*²*Институт радиоастрономии Национальной Академии наук Украины, Украина, Харьков, 61002, ул. Краснознаменная, 4*³*Харьковский национальный университет, Украина, Харьков, 61077, пл. Свободы, 4*

Аннотация. Представлены примеры, иллюстрирующие поиск различных двухслойных метаматериалов, обеспечивающих вращение плоскости поляризации («оптическая активность»). Подбор объектов иллюстрирует двадцатилетнюю историю поиска нового принципа создания вращателей поляризации на планарных метаматериалах, реализованных в виде тонкослойных периодических решеток. Само проявление оптической активности как таковой, наличие или отсутствие удовлетворительного или идеального согласования, возможность многополосного эффекта, роль высших пространственных гармоник в «электродинамике» явления объясняются спецификой собственных колебаний возбуждаемых в зазоре многослойной структуры.

Ключевые слова: 2D киральность; двухслойный экран; двухслойная диафрагма; оптическая активность; диэдральная симметрия; собственные колебания

1. ВВЕДЕНИЕ

Первые публикации о так называемых метаматериалах, нашедших неожиданные применения в микроволновой технике и оптике, вызвали всплеск исследований. В первую очередь они были сосредоточены на новых полезных свойствах 3D объектов со сложной геометрией, ранее слабо изученных. Это стало возможным благодаря быстрому прогрессу в

электродинамическом моделировании и открывшимся возможностям в свободном манипулировании 3D формой объектов.

Далее остановимся только на одном из новых электродинамических эффектов, наблюдаемых в метаматериалах — вращении плоскости поляризации волны, прошедшей через плоско-киральную композитную решетку или соответствующую волноводную диафрагму*.

* Предварительные материалы данной статьи доложены на конференции MSMW2016 (Харьков, 2016): А. Kirilenko, S. Prosvirnin, A. Perov, S. Steshenko, V. Derkach, N. Kolmakova, S. Prikolotin, D. Kulik, "On the nature and general regularities of optical activity in planar-chiral double-layer metamaterials," (Invited paper), Proc. of the 9 Int. Kharkiv Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016), Kharkiv, Ukraine, June 21–24, 2016, 6 p.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Holloway, C. L.; Kuester, E. F.; Gordon, J. A.; O'Hara, J.; Booth, J.; Smith, D. R. An overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 54, No. 2, p. 10–35, 2012. DOI: [10.1109/MAP.2012.6230714](https://doi.org/10.1109/MAP.2012.6230714).
2. Pendry, J. B. A chiral route to negative refraction. *Science*, vol. 306, No. 5700, 2004, p.1353–1355. DOI: [10.1126/science.1104467](https://doi.org/10.1126/science.1104467).
3. Arnaut, L. R.; Davis, L. E. On planar chiral structures. *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS 1995)*, 24–28 July, Seattle, WA, p. 165.
4. Arnaut, L. R. Chirality in multi-dimensional space with application to electromagnetic characterisation of multi-dimensional chiral and semi-chiral media. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 11, No. 11, p. 1459–1482, 1997. DOI: [10.1163/156939397X00549](https://doi.org/10.1163/156939397X00549).
5. Prosvirnin, S. L. Analysis of electromagnetic wave scattering by plane periodical array of chiral strip elements. *Proc. of 7th Int. Conf. on Complex Media «Bianisotropics-98»*, 3–6 June 1998, 185–188, Technische Universitat Braunschweig, Germany. DOI: [10.13140/2.1.1744.1929](https://doi.org/10.13140/2.1.1744.1929).
6. Prosvirnin, S. L. Transformation of polarization when waves are reflected by a microstrip array made of complex-shaped elements. *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 44, No. 6, p. 635–639, 1999.
7. Kwon, D.-H.; Werner, P. L.; Werner, D. H. Optical planar chiral metamaterial designs for strong circular dichroism and polarization rotation. *Optics Express*, vol. 16, No. 16, p. 11802–11807, 2008. DOI: [10.1364/OE.16.011802](https://doi.org/10.1364/OE.16.011802).
8. Decker, M.; Ruther, M.; Kriegler, C. E.; Zhou, J.; Soukoulis, C. M.; Linden, S.; Wegener, M. Strong optical activity from twisted-cross photonic metamaterials. *Optics Letters*, vol. 34, No 16, p. 2501–2503, 2009. DOI: [10.1364/OL.34.002501](https://doi.org/10.1364/OL.34.002501).
9. Rogacheva, A. V.; Fedotov, V. A.; Schwanecke, A. S.; Zheludev, N. I. Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, p. 177401, 2006. DOI: [10.1103/PhysRevLett.97.177401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.177401).
10. Mackay, A. Proof of polarization independence and nonexistence of crosspolar terms for targets presenting n-fold ($n > 2$) rotational symmetry with special reference to frequency-selective surfaces. *Electron. Lett.*, vol. 25, No 24, p. 1624–1625, 1989. DOI: [10.1049/el:19891088](https://doi.org/10.1049/el:19891088).
11. Sonsilphong, A.; Gutruf, P.; Withayachumnankul, W.; Abbott, D.; Bhaskaran, M.; Sriram, S.; Wongkasem, N. Flexible bi-layer terahertz chiral metamaterials. *Journal of Optics*, vol. 17, No. 8, p. 085101, 2015. DOI: [10.1088/2040-8978/17/8/085101](https://doi.org/10.1088/2040-8978/17/8/085101).
12. Plum, E.; Zhou, J.; Dong, J.; Fedotov, V. A.; Koschny, T.; Soukoulis, C. M.; Zheludev, N. I. Metamaterial with negative index due to chirality. *Phys. Rev. B*, vol. 79, p. 035407, 2009. DOI: [10.1103/PhysRevB.79.035407](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.035407).
13. Zarifi, D.; Soleimani, M.; Nayyeri, V. Dual- and multiband chiral metamaterial structures with strong optical activity and negative refraction index. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, p. 334–337, 2012. DOI: [10.1109/LAWP.2012.2191261](https://doi.org/10.1109/LAWP.2012.2191261).
14. Zarifi, D.; Soleimani, M.; Nayyeri, V.; Rashed-Mohassel, J. On the miniaturization of semiplanar chiral metamaterial structures. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, No. 12, p. 5768–5776, 2012. DOI: [10.1109/TAP.2012.2214015](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2214015).
15. Zarifi, D.; Soleimani, M.; Nayyeri, V. A novel dual-band chiral metamaterial structure with giant optical activity and negative refractive index. *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 26, p. 251–263, 2012. DOI: [10.1163/156939312800030767](https://doi.org/10.1163/156939312800030767).
16. Gordon, R.; Brolo, A. G.; McKinnon, A.; Rajora, A.; Leathem, B.; Kavanagh, K. L. Strong polarization in the optical transmission through elliptical nanohole arrays. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 92, No. 3, p. 037401, 2004. DOI: [10.1103/PhysRevLett.92.037401](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.037401).
17. Derkach, V.; Kirilenko, A.; Salogub, A.; Prikolotin, S.; Kolmakova, N.; Ostrizhnyi, Ye. Giant optical activity in artificial planar-chiral structures. *Proc. of Int. Kharkov Symp. MSMW'13*, 23–28 Jun. 2013, Kharkov, Ukraine. IEEE, 2013, p. 435–438. DOI: [10.1109/MSMW.2013.6622098](https://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622098).
18. Li, Z.; Zhao, R.; Koschny, T.; Kafesaki, M.; Alici, Kamil Boratay; Colak, E.; Caglayan, H.; Ozbay, E.; Soukoulis, C. M. Chiral metamaterials with negative

refractive index based on four 'U' split ring resonators. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, p. 081901, 2010. DOI: [10.1063/1.3457448](https://doi.org/10.1063/1.3457448).

19. Kirilenko, A.; Kolmakova, N.; Prikolotin, S. Plane-chiral pair with opposite rotations as a new way to rotate polarization up to 90°. *Proc. of Int. Conf. MMET*, 28–30 Aug. 2012, Kharkiv, Ukraine. IEEE, 2012, p. 80–83. DOI: [10.1109/MMET.2012.6331155](https://doi.org/10.1109/MMET.2012.6331155).

20. Kolmakova, N.; Prikolotin, S.; Perov, A.; Derkach, V.; Kirilenko, A. Polarization plane rotation by arbitrary angle using D4 symmetrical structures. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 64, No. 2, p. 429–435, 2016. DOI: [10.1109/TMTT.2015.2509966](https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2509966).

21. Li, Z.; Caglayan, H.; Colak, E.; Zhou, J.; Soukoulis, Costas M.; Ozbay, E. Coupling effect between two adjacent chiral structure layers. *Optics Express*, vol. 18, No. 6, p. 5375–5383, 2010. DOI: [10.1364/OE.18.005375](https://doi.org/10.1364/OE.18.005375).

22. Maslovski, S. I.; Morits, D. K.; Tretyakov, S. A. Symmetry and reciprocity constraints on diffraction by gratings of quasi-planar particles. *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, vol. 11, No. 7, p. 074004, 2009. DOI: [10.1088/1464-4258/11/7/074004](https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/7/074004).

23. Колмакова, Н. Г.; Кириленко, А. А.; Просвирнин, С. Л. Плоско-киральные диафрагмы в круглом волноводе и проявления «оптической активности». *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 16, № 1, p. 70–81, 2011. URL: <http://journal.rian.kharkov.ua/index.php/ra/article/view/454>.

24. Кириленко, А. А.; Сенкевич, С. Л.; Тысик, Б. Г. Закономерности резонансных явлений в открытых структурах волноводного типа. *Радиотехника и электроника*, Т. 35, № 4, p. 687–694, 1990.

25. Cornwell, J. F. Appendix C: Character tables for the crystallographic point groups. In *Group Theory in Physics: An Introduction*. New York, NY, USA: Academic, 1997.

26. Kolmakova, N.; Prikolotin, S.; Kirilenko, A.; Perov, A. Simple example of polarization plane rotation by the fringing fields interaction. *Proc. of European Microwave Conf.*, 6–10 Oct. 2013, Nuremberg. IEEE,

2013, p. 936–938. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6686812/>.

27. Кириленко, А. А.; Колмакова (Дон), Н. Г.; Приколотин, С. А. Сверхкомпактная 90° скрутка на основе пары плоско-киральных диафрагм в квадратном волноводе. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 55, № 4, С. 31–35, 2012. URL: <http://radio.kpi.ua/article/view/S002134701204005X>.

28. Kirilenko, A. A.; Perov, A. O. On the common nature of the enhanced and resonance transmission through the periodical set of holes. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, No. 10, p. 3210–3216, 2008. DOI: [10.1109/TAP.2008.929437](https://doi.org/10.1109/TAP.2008.929437).

29. Колмакова (Дон), Н. Г.; Перов, А. О.; Сенкевич, С. Л.; Кириленко, А. А. Аномальное прохождение ЭМВ сквозь запредельные отверстия и собственные колебания волноводных объектов и периодических структур. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 54, № 3, p. 3–13, 2011. URL: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347011030010>.

30. Kirilenko, A. A.; Tysik, B. G. Connection of S-matrix of waveguide and periodical structures with complex frequency spectrum. *Electromagnetics*, vol. 13, No. 3, p. 301–318, 1993. DOI: [10.1080/02726349308908352](https://doi.org/10.1080/02726349308908352).

31. Munk, B. A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. New York: Wiley, 2000.

32. Perov, A. O.; Kirilenko, A. A.; Derkach, V. N. Polarization response manipulation for compound circular hole fishnet metamaterial. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, p. 117–120, April 2016. DOI: [10.1109/LAWP.2016.2559452](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2559452).

33. Кулик, Д. Ю.; Перов, А. О.; Мосьпан, Л. П.; Колмакова, Н. Г. Компактные вращатели плоскости поляризации на основе диафрагм с прямоугольными щелями. *Радиофизика и электроника*, т. 20, № 2, с. 96–101, 2015.

34. Кулик, Д. Ю.; Стешенко, С. А.; Кириленко, А. А. Компактные вращатели плоскости поляризации на заданный угол в квадратном волноводе. *Радиофизика и электроника*, т. 22, № 1, С. 15–20, 2017.

Поступила в редакцию ? По-сле переработки question