

Новый класс искусственных геометрически-киральных 3D структур

Акад. Гуляев Ю.В., Неганов В.А., Осипов О.В., Пряников Е.И.

1. Введение в проблему киральных структур

В многообразии композиционных материалов особняком стоят искусственные среды и структуры, обладающие свойством киральности или энантиоморфизма (от греч. — $\chi\epsilon\iota\rho$ — «рука»). *Киральность* обозначает свойство живого (или неживого) объекта не совмещаться со своим отображением в плоском зеркале при каком-либо перемещении и вращении [1]. Киральность, по своей сути является проявлением асимметрии левого и правого в живой и неживой природе. Данное явление имеет место в различных областях человеческого знания, таких как физика, химия, биология* и др. Громадное число фактов указывает на то, что в живой и неживой природе нарушена симметрия правого и левого [2]. В частности, в биохимии известно существование киральных биомолекул, различие между которыми состоит лишь в том, что они являются зеркальными отражениями друг друга, имея один и тот же химический состав (часто самый тонкий анализ не в состоянии отличить одно вещество от другого). Так, например, в химии различие между сахарами глюкозой и галактозой (состав этих веществ идентичен) определяется пространственной конфигурацией асимметричного углеродного атома. Каждая из двух таких конфигураций является зеркальным отражением другой. Известно, что в организме человека возникает киральная протоструктура, в состав которой входят чистые L-аминокислоты и D-пентоза, определяющие спиральность молекул ДНК.

* В химии и биологии применяется термин «хиральность», по своей сути эквивалентный используемому в физике термину «киральность».

Естественные среды, обладающие киральными свойствами, известны еще с XIX века в оптике, где получили название оптически-активных; они обладают различными показателями преломления для волн с право и лево-круговыми поляризациями. Вторым примером киральной среды в оптике являются холестерические жидкие кристаллы (ХЖК), домены которых состоят из отдельных слоёв, взаимная ориентация молекул в которых монотонно меняется при переходе от слоя к слою путём их вращения по окружности (эфир холестерина). В оптическом диапазоне также имеет место и наведённая (искусственная) оптическая активность среды, проявляющаяся лишь при помещении неактивного материала в постоянное магнитное поле (эффект Фарадея).

Искусственная среда, обладающая киральными свойствами в СВЧ диапазоне, изготавливается с помощью искусственных проводящих одно-, двух- или трехмерных микроэлементов («молекул») зеркально асимметричной формы, размеры которых значительно меньше длины электромагнитной волны [3-7], обычно хаотически ориентированных и периодически размещённых на расстояниях, соизмеримых с длиной волны излучения. В качестве киральных элементов могут быть использованы трехмерные (сферические частицы со спиральной проводимостью [8], разомкнутые кольца с выступающими концами [9] и др.) и двухмерные объекты (микрополосковые элементы в виде буквы S и ее зеркального эквивалента [10], плоские n-заходные спирали, ленты Мёбиуса [11] и др.). Поэтому принято говорить о существовании двух моделей киральной среды: *объёмной* (3D), когда в магнитодиэлектрической среде размещаются двух- или трехмерные микроэлементы, и *плоской* (2D), когда проводящие микрополосковые элементы зеркально асимметричной формы расположены на поверхности диэлектрической или ферритовой подложки [12].

2. Физически- и геометрически-киральные структуры

Указанные выше трехмерные и планарные структуры являются киральными в силу того, что в их состав входят микроскопические зеркально асимметричные элементы. Можно считать, что в этом случае киральность являет-

ся *физической*, так как она создается не формой структуры в целом, а находящимися в ней микроэлементами. Будем называть подобные структуры *физически-киральными*.

Физически-киральные искусственные киральные структуры обладают по крайней мере четырьмя существенными недостатками:

1. Они достаточно сложны в изготовлении (особенно это касается 3D-структур).
2. Пространственная дисперсия существенно проявляется в них только вблизи длин волн $\lambda = 2ml$, где l — пространственный период структуры; $m = \overline{1, \infty}$.
3. При включении физически-киральной структуры в цепь СВЧ их трудно согласовывать, так как наблюдается сильная частотная зависимость входного (волнового) сопротивления.
4. Диаграмма излучения (переизлучения) физически-киральных структур сильно зависит от отношения l/λ .

В работе [13] предложено геометрическое решение свойства киральности (*геометрически-киральные структуры*), заключающееся в том, что структура является киральной по форме, а не по содержанию. В предлагаемой модели искусственно воспроизводится структура доменов холестерических жидких кристаллов (рис.1,а). Структура состоит из большого количества слоев, каждый из которых представляет собой упорядоченную киральную композицию из микропластин двух различных материалов. Аналогом директора ХЖК в данной структуре является один из крайних элементов симметричной композиции, вращательное повторение отсутствия которого по (против) часовой стрелки с определённой угловой периодичностью, создаёт локальную асимметрию, что приводит к возникновению киральности 3D структуры в целом (рис.1,б). Стрелками на рис.1,б показано вращение в горизонтальных плоскостях отсутствующего крайнего элемента по часовой стрелке. Геометрически-киральная многослойная метаструктура с одним директором, показанная на рис.1,б является аналогом ХЖК. С точки зрения терминологии антенн — это аналог цилиндрической спиральной антенны.

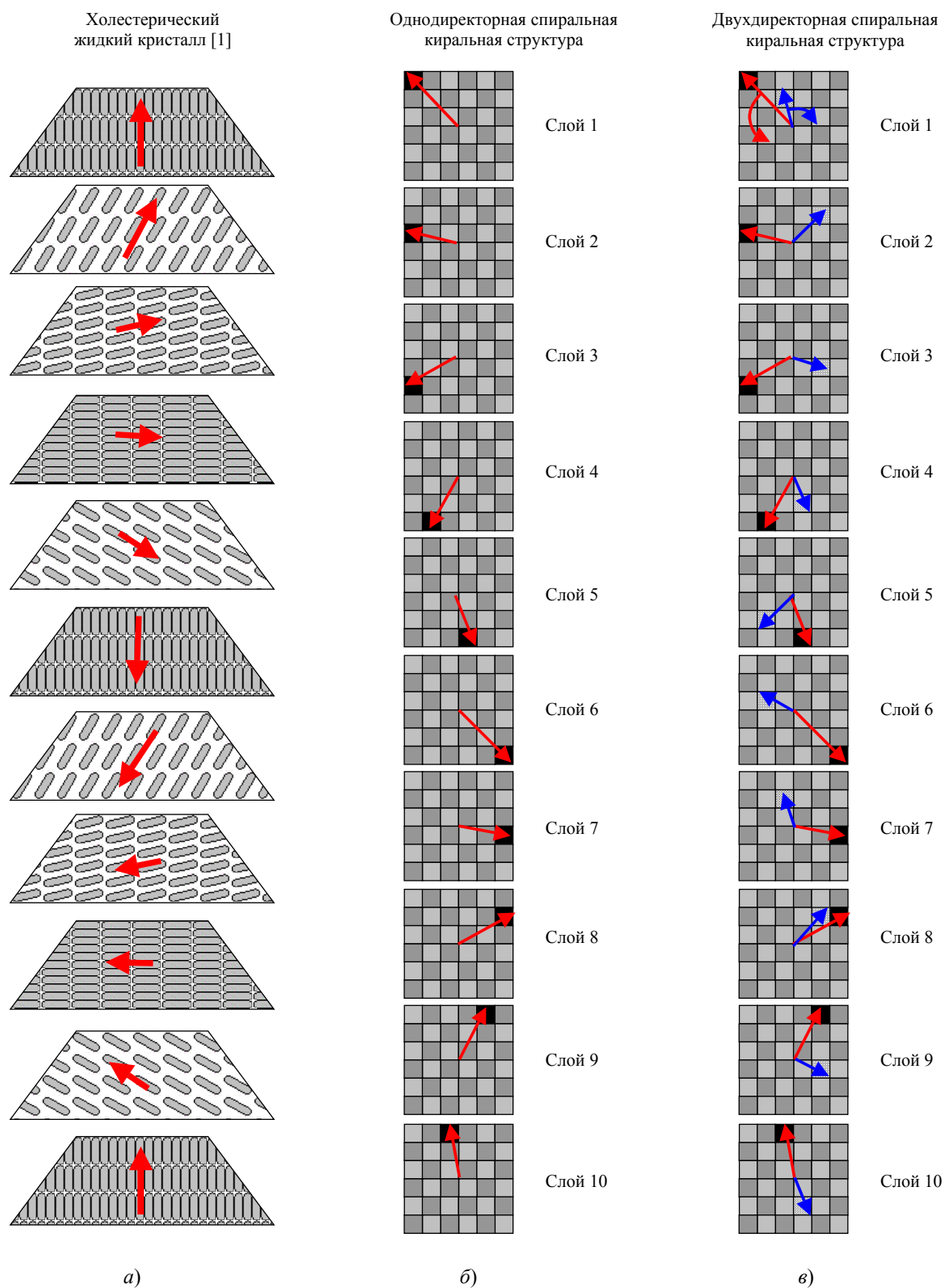


Рисунок 1 — Виды слоев геометрически-киральных метаструктур:

а — домен естественного ХЖК;

б — геометрически-киральная метаструктура с одним директором;

в — геометрически-киральная метаструктура с двумя директорами

На рис.1,б показана многослойная геометрически-киральная метаструктура с двумя директорами, в которой вращение отсутствующих элементов в горизонтальных слоях происходит в противоположных направлениях (по и против часовой стрелки) в двух соседних вертикальных слоях. Это аналог двухзаходной спиральной антенны [14].

Связь между слоями может быть выполнена с помощью межслойных гальванических переходов (сквозь горизонтальные слои) с непосредственными контактами между отдельными квадратными слоями или переходов с электромагнитной связью без нарушения целостности слоёв.

Предложенные многослойные геометрически-киральные 3D метаструктуры гораздо проще в изготовлении, чем физически-киральные 3D структуры. Применяя основные результаты существующей на сегодняшний день теории цилиндрических однозаходной и двухзаходной спиральных антенн можно предположить следующее:

1. При $\lambda \approx D$, где D — длина квадрата геометрически-киральной метаструктуры с одним директором в горизонтальной плоскости (рис.1,б) возможно осевое излучение (переизлучение) электромагнитной волны с круговой поляризацией в направлении, перпендикулярном горизонтальным плоскостям структуры.

2. В нулевом приближении расстояние между горизонтальными слоями $s = (0.15 \div 0.3)\lambda_0$, где λ_0 — центральная частота рабочего диапазона длин волн, который определяется из условия: $0.7L \leq \lambda \leq 1.3L$ (L — длина структуры в вертикальном направлении). Таким образом, одним из достоинств геометрически-киральных многослойных метаструктур с одним директором является достаточно широкая диапазонность ($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} \approx 1.7$).

3. Активная часть входного сопротивления структуры слабо зависит от отношения L/λ .

4. При использовании метаструктуры с двумя директорами (рис.1,в) можно ещё более увеличить рабочий диапазон длин волн; при этом можно использовать свойства двухзаходных спиральных антенн [15].

5. При создании геометрически-киральной конической спирали (рис.2) можно создать почти частотно независимую метаструктуру. Предполагаемая область частот таких метаструктур от 10^{-3} до 10^{10} Гц.

6. При одновременном использовании нескольких геометрически-киральных структур возможно создание решёток с уменьшенной шириной главного лепестка осевого излучения (переизлучения).

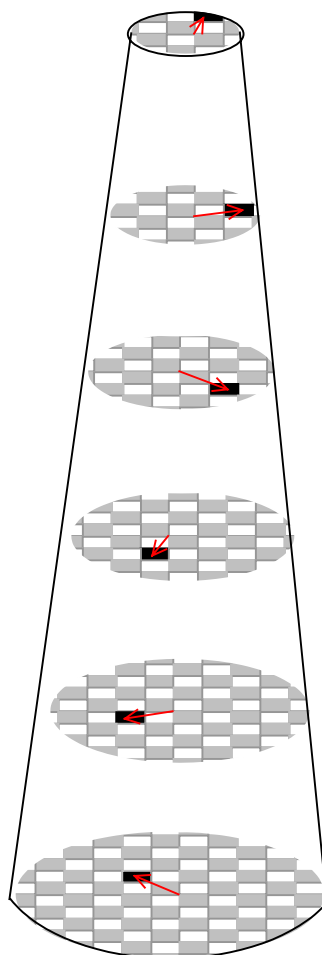


Рисунок 2 — Геометрически киральная метаструктура с одним директором и образующей поверхностью в виде конуса

Рассмотренные элементы 3D структур, по-видимому, топологически описывается неевклидовой метрикой, находящей своё материальное воплощение в приведённых принципах взаимодействия когерентных структур фазированных антенных решёток (ФАР), которыми по сути и являются композитные киральные 3D структуры. Неевклидова размерность метрики, по-видимому, особенно сильно должна проявиться при создании 4D-метаструктур, где базовой структурой является лист Мёбиуса.

Многослойные геометрически киральные структуры позволяют осуществлять адекватную оценку наличия и интенсивности полей различного происхождения в ближних зонах излучающих (переизлучающих) устройств, поскольку сами изделия являются по сути фазированными антенными решётками и могут быть описаны физико-математическим аппаратом, применяемом для расчёта эквивалентных длинных линий в теории устройств СВЧ, КВЧ и ФАР.

Композиционные метаструктуры могут включать в себя полупроводниковые, пьезо- и сегнетоэлектрические, диэлектрические, ферритовые материалы, ленгмюровские плёнки, естественные киральные среды (например, жидкие кристаллы), искусственные наноматериалы, амфифильные молекулы широкого класса веществ и любые иные композиционные сочетания, приводящие к ожидаемым эффектам перечисленным выше.

Возможное применение предложенных структур — создание малоотражающих покрытий в широком диапазоне длин волн. Для сравнения, создание малоотражающих покрытий на физически-киральных структурах возможно только вблизи резонансных частот, определяемых размерами киральных микроэлементов. Электромагнитное поле излучения (переизлучения) геометрически-киральных структур в отличие от физически-киральных может иметь круговую поляризацию. Применение теории спиральных антенн к анализу геометрически-киральных структур позволяет сделать вывод, что в зависимости от соотношения D/λ предложенные структуры могут иметь различные режимы излучения (переизлучения): осевое излучение, излучение по горизонтальной плоскости структуры, излучение с несколькими максимумами в диаграмме направленности. Предложенные модели многослойных геометрически-киральных структур могут быть использованы при анализе волновых процессов в естественных средах: ХЖК, смерчей и торнадо в атмосфере и т.д.

Таким образом, предложенный новый класс искусственных геометрически-киральных 3D структур обладает гораздо большими возможностями, чем физически-киральные структуры.

Материал подготовлен с использованием [13].

Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь / Под ред. *А.М. Прохорова*. — М.: Большая российская энциклопедия, 1995. — 928 с.
2. *Транезов О.В.* Эволюционирующие системы левосторонне-асимметричны? // [http:// www.philosophy.nsc.ru/life/journals/philscience/2_96/05_trap.htm](http://www.philosophy.nsc.ru/life/journals/philscience/2_96/05_trap.htm).
3. *Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J.* Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media. London: Artech House, 1994. — 291 p.
4. *Каценеленбаум Б.З., Коршунова Е.Н., Сивов А.Н., Шатров А.Д.* Киральные электродинамические объекты // Успехи физических наук, 1997. — Т.167. — №11. — С.1201-1212.
5. *Lakhtakia A., Varadan V.K., Varadan V.V.* Time-harmonic electromagnetic fields in chiral media. Lecture Notes in Physics. Berlin: Heidelberg and Boston: Springer-Verlag, 1989. — 121 p.
6. *Третьяков С.А.* Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника, 1994. — Т.39. — №10. — С.1457-1470.
7. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами — М.: Радио и связь, 2006. — 280с.
8. *Шевченко В.В.* Дифракция на малой киральной частице // Радиотехника и электроника, 1995. — Т.40. — №12. — С.1777-1788.
9. *Tretyakov S.A., Mariotte F.* Maxwell Garnett modeling of uniaxial chiral composites with bianisotropic inclusions // Journal of electromagnetic waves and applications, 1995. — V.9. — №7/8 — С.1011-1025.
10. *Просвирнин С.Л.* Преобразование поляризации при отражении волн микрополосковой решеткой из элементов сложной формы // Радиотехника и электроника, 1999. — Т.44. — №6. — С.681-686.
11. *Jaggard D., Engheta N., Kowarz M.W., Pelet P., Liu J. C., Kim Y.* Periodic chiral structures // IEEE Trans. — 1989. — V. AP-37. — №11. — P.1447-1452.
12. *Arnaut L.R.* Mutual coupling in arrays of planar chiral structures // In Advances in Complex Electromagnetic Materials (ed. by **A. Priou, A. Sihvola, S. Tretyakov, A. Vinogradov**), Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers. — 1997. — V.28. — P.293-309.
13. Свидетельство о регистрации и депонировании произведения — объекта авторских (смежных) прав №319. Физически- и геометрически-киральные многослойные тонкослоистые метаструктуры / *Гаврилов В.Ю., Неганов В.А., Осипов О.В., Пряников И.В., Савранский В.В.* Зарегистрировано в Реестре за №1100319 от 10.07.2007 ООО «Юридическая фирма Городисский и Партнёры».
14. *Драбкин А.Л., Зузенко В.И., Кислов А.Г.* Антенно-фидерные устройства. — М.: «Сов. Радио», 1974. — 536 с.
15. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны / Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. — М.: «Энергия», 1975. — 528 с.