

ФИЗИЧЕСКИ- И ГЕОМЕТРИЧЕСКИ-КИРАЛЬНЫЕ МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОНКОСЛОИСТЫЕ МЕТАСТРУКТУРЫ

§1. Введение в проблему киральности

В настоящее время в теоретической и прикладной электродинамике, и областях науки тесно к ней примыкающих, наблюдается значительный рост интереса к исследованию структур и искусственных метаматериалов (таких, как искусственные кристаллы), обладающих «пространственной памятью». Указанные структуры и их сложные композиционные соединения представляют практический интерес в связи с активным исследованием и разработкой мета- и наноструктур. В многообразии обозначенных композиционных материалов особняком стоят искусственные среды и структуры, обладающие свойством киральности или энантиоморфизма (от греч. — χεῖρ — «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.

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

В последнее время все большее доказательство получают научные теории и гипотезы о существовании вращательной асимметрии биоорганического мира [3]. Так, известно, что в организме человека возникает киральная протоструктура, в состав которой входят чистые L-аминокислоты и D-пентоза, определяющие спиральность молекул ДНК. Их киральные изомеры не принимают участия в биохимических процессах, протекающих в организме.

Все описанные выше и многие другие факты являются выражением киральности, то есть проявления асимметрии правого и левого.

Естественные среды, обладающие киральными свойствами, известны еще с XIX века в оптике, где получили название оптически-активных. Явление оптической активности было открыто в 1811 году французским ученым Д.Ф. Араго в кварце [4]. В 1823 году О.Ж. Френель доказал, что оптически активная среда обладает различными показателями преломления для волн с право и левокруговыми поляризациями [4]. В 1860 году известный биолог Луи Пастер объяснил природу этого явления молекулярной асимметрией, когда формы молекул лево- и правовращающихся изомеров относятся друг к другу как зеркальные отображения. Левовращающиеся молекулы получили название L-изомеров, а правовращающиеся — D-изомеров. Основным свойством оптически-активной среды является возможность вращения плоскости поляризации электромагнитного излучения, проходящего через нее (среду).

Вторым примером киральной среды в оптике являются холестерические жидкие кристаллы (ХЖК). Само строение ХЖК позволяет трактовать их как киральную среду: оси молекул (директор ХЖК), лежащих в одной плоскости, направлены в одну сторону, однако оси молекул в соседней параллельной плоскости повернуты относительно них на некоторый угол [5, 6]. В результате ориентировка осей молекул в самом верхнем и самом нижнем слое домена ХЖК такова, что директор в промежуточных слоях как бы вращается по окружности по или против часовой стрелке. Таким образом, домен ХЖК состоит из отдельных слоев, взаимная ориентация молекул в которых монотонно меняется при переходе от слоя к слою путем их вращения по окружности. Шаг спиральной структуры может быть достаточно большим и достигать нескольких мкм. Примером ХЖК являются эфиры холестерина.

В оптическом диапазоне также имеет место искусственная (наведённая) оптическая активность среды, проявляющаяся лишь при помещении неактивного материала в магнитное поле (эффект Фарадея).

Таким образом, в оптическом диапазоне киральными свойствами обладают либо естественные оптически активные материалы, либо неактивные среды, помещенные в магнитное поле. Объяснением оптической активности является наличие изменения электромагнитного поля оптической волны на расстояниях порядка размеров d молекулы (иона), то есть влияние пространственной дисперсии. Направление поворота плоскости поляризации в оптически-активной среде зависит от формы изомера (L или D).

§2. Искусственные киральные среды

Среда, обладающая киральными свойствами в СВЧ-диапазоне, может быть только искусственной. Киральные «молекулы» на СВЧ — это искусственные проводящие одно-, двух- или трехмерные микроэлементы зеркально асимметричной формы, размеры которых значительно меньше длины λ электромагнитной волны [7-12]. Киральная среда обладает пространственной дисперсией, поэтому зеркально асимметричные микроэлементы должны периодически размещаться на расстояниях l , соизмеримых с длиной волны излучения. Ориентация геометрических осей микроэлементов должна быть хаотической, поэтому на макроскопическом уровне киральная среда является биизотропной. Если же все киральные микроэлементы ориентированы в одном направлении, то структура начинает обладать анизотропией.

Лишь в конце XX века в электродинамике СВЧ значительно возрос интерес к исследованию и созданию композиционных искусственных сред, обладающих пространственной дисперсией в указанных диапазонах, хотя на возможность их создания указывалось достаточно давно. Одним из примеров таких материалов является уже упомянутая киральная среда, представляющая собой совокупность хаотически ориентированных и равномерно распределенных в изотропной диэлектрической среде проводящих зеркально асимметричных элементов.

В качестве киральных элементов могут использоваться трехмерные (право- и левовинтовые металлические спирали, сферические частицы со спиральной проводимостью [13], разомкнутые кольца с выступающими концами [14] и др.) и двумерные микроскопические объекты (полосковые элементы в виде буквы S и ее зеркального эквивалента [15-17], плоские п-заходные спирали, ленты Мёбиуса [18] и др.).

§3. Модели киральной среды. Физическая и геометрическая киральности

На настоящий момент времени в электродинамике принято говорить о существовании двух моделей киральной среды. Первая модель называется *объёмной* (3D) и в ней киральные микроэлементы являются двух- или трехмерными и размещаются внутри магнитодиэлектрической среде. Примером киральной среды на основе 3D-элементов является структура, состоящая из проводящих микроскопических спиралей, периодически размещенных и хаотически ориентированных в однородной изотропной диэлектрической среде. Известны экспериментальные исследования свойств киральных сред на основе право и левовинтовых спиралей [19-20]. Пример объёмной модели киральной среды и некоторые виды киральных элементов приведены на рис. 1.

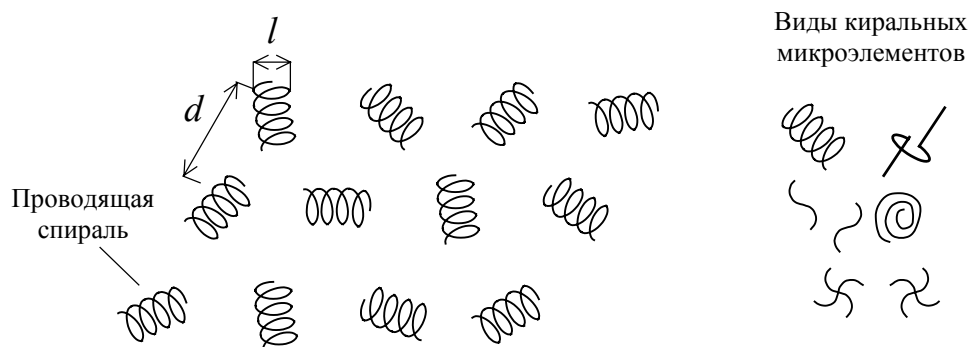


Рисунок 1 — Киральная среда на основе 3D-элементов

Вторая модель называется *планарной* и отождествляется с *квазикиральной средой*. В ней киральные элементы представляют собой проводящие микроскопические полоски зеркально асимметричной формы, которые

равномерно располагаются на поверхности диэлектрической или ферритовой подложки. С точки зрения технической реализации киральной структуры, планарная модель является более предпочтительной, однако степень её киральности меньше, чем у трехмерной киральной структуры. Увеличение киральности структуры в целом может быть достигнуто при создании многослойных киральных метаструктур, на границах раздела слоев которых расположены полосковые киральные микроэлементы. Электродинамические свойства однослойных решеток на основе полосковых киральных элементов подробно исследованы в научной литературе [15-17,21-22]. Пример планарной киральной структуры приведен на рисунке 2 [15].

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

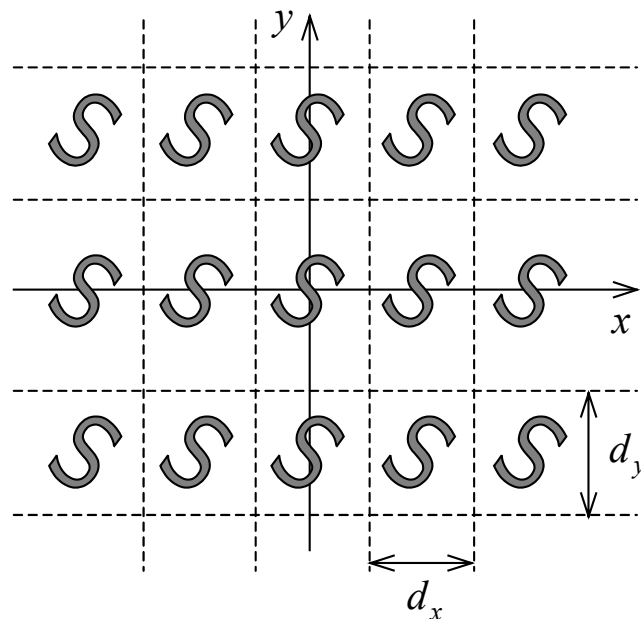


Рисунок 2 — Двупериодическая планарная киральная структура

Заметим, что физически-киральные среды СВЧ могут быть описаны посредством трёх материальных параметров. Наряду с относительными диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостями вводится параметр физиче-

ской киральности χ , который входит в материальные уравнения для киральной среды следующим образом:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \mp i\chi \vec{H}, \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \pm i\chi \vec{E}, \quad (1)$$

где $\vec{E}$ и $\vec{H}$ — векторы напряженностей электрического и магнитного полей; $\vec{D}$ и $\vec{B}$ — векторы электрической и магнитной индукций. Верхние знаки в (1) соответствуют физически-киральной среде на основе правых зеркальных форм киральных элементов; нижние знаки — среде на основе левых зеркальных форм. Материальные уравнения (1) записаны в системе СГС.

В [12] показано, что физически-киральная среда, являясь гиротропной, может быть описана материальными уравнениями, содержащими тензорные проницаемости $\overset{=}{\varepsilon}$ и $\overset{=}{\mu}$:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \overset{=(\pm)}{\varepsilon} \vec{E}, \quad \vec{B} = \overset{=(\pm)}{\mu} \vec{H}; \\ \overset{=(\pm)}{\varepsilon} &= \begin{bmatrix} \varepsilon & \pm i\chi_E & 0 \\ \mp i\chi_E & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{bmatrix}, \quad \overset{=(\pm)}{\mu} = \begin{bmatrix} \mu & \mp i\chi_H & 0 \\ \pm i\chi_H & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\overset{=(\pm)}{\varepsilon}$ и $\overset{=(\pm)}{\mu}$ — тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей физически-киральной среды; $\chi_E = \chi/\eta$, $\chi_H = \chi\eta$, $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$. Верхние знаки соответствуют киральной среде на основе спиралей с правой закруткой, а нижние знаки — киральной среде на основе левовинтовых спиралей. Параметр киральности χ входит в недиагональные элементы тензоров бигиротропной среды. Ось гиротропии направлена вдоль оси Oz .

Заметим, что определители матриц в (2) равны:

$$\text{Det} \overset{=(\pm)}{\varepsilon} = \varepsilon^3 - \chi_E^2 \varepsilon; \quad \text{Det} \overset{=(\pm)}{\mu} = \mu^3 - \chi_H^2 \mu,$$

то есть зависят от параметра физической киральности среды.

Параметр физической киральности в общем случае определяется размером, формой микрочастиц и их концентрацией в среде, то есть учитывает резонансные свойства самого кирального элемента. Это приводит к тому, что физически-киральную среду (структуру) необходимо создавать для конкретного (достаточно узкого) диапазона частот падающих волн, вблизи резонанс-

ной частоты используемого кирального элемента. Как следствие, 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 [23] предложено геометрическое решение свойства киральности (*геометрически-киральные структуры*), заключающееся в том, что структура является киральной по форме, а не по внутреннему содержанию. В предлагаемой модели воспроизводится структура доменов холестерических жидких кристаллов. 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. Дополнительно степень киральности может быть увеличена путём вращения с определённой угловой периодичностью соседних слоёв многослойной структуры друг относительно друга, а также чередованием направления вращения по (против) часовой стрелки.

Форма поверхности слоёв 3D структуры, форма структуры в целом и форма самих элементов структуры могут быть произвольными и не обязательно описываться всеми известными криволинейными координатами. Пример геометрически-киральной структуры показан на рисунке 3. На рисунке показаны модели двух- и однодиректорной спиральной киральной искусственной структуре. Однодиректорная структура (рис.3б) состоит из на-

бора композиционных слоев из квадратных элементов двух видов. Геометрическая киральность структуры создается отсутствием в каждом слое одного элемента, который задает направление директора искусственной метаструктуры, причем при переходе от верхнего к нижнему слою конец директора описывает окружность по часовой стрелке. В двухдиректорной структуре (рис.3а) геометрическая киральность создается отсутствием двух элементов различного типа, расположенных на различных уровнях композиционной структура. Отсутствующие элементы задают направления двух директоров, один из которых при переходе от верхнего к нижнему слою описывает окружность по часовой стрелке, а другой — против часовой стрелке. В общем случае геометрически киральная структура может обладать $N-1$ директорами (где N — число квадратных элементов на одной стороне структуры).

На рис. 4 подробно показаны направления директоров многослойной геометрически-киральной структуры в случае одно и двухдиректорной модели. Для сравнения на рис.4в показаны направления директора в слоях домена естественного ХЖК.

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.

Пусть каждый слой многослойной однодиректорной геометрически-киральной структуры состоит из активных и неактивных квадратных элементов, число которых в одном ряду слоя равно 4. Будем отождествлять активную среду с единицей; неактивную — с нулём. Тогда слои геометрически-киральной структуры могут быть описаны некоторыми матрицами:

$$\begin{aligned} \bar{\bar{S}}_1 &= \begin{pmatrix} \boxed{0} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \bar{\bar{S}}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \boxed{0} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \bar{\bar{S}}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \boxed{0} & 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ \bar{\bar{S}}_4 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \boxed{0} \end{pmatrix}; \bar{\bar{S}}_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \boxed{0} \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \bar{\bar{S}}_6 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \boxed{0} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где выделен элемент, отвечающий за киральную асимметрию композиции текущего слоя.

Заметим, что определители отдельных матриц $\overline{\overline{S}}_j$ и матрицы всей геометрически-киральной структуры равны нулю, что может говорить о независимости свойств метаструктуры от размеров активных и неактивных слоёв и частоты падающего электромагнитного поля.

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.4,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 ($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} \approx 1.7$).

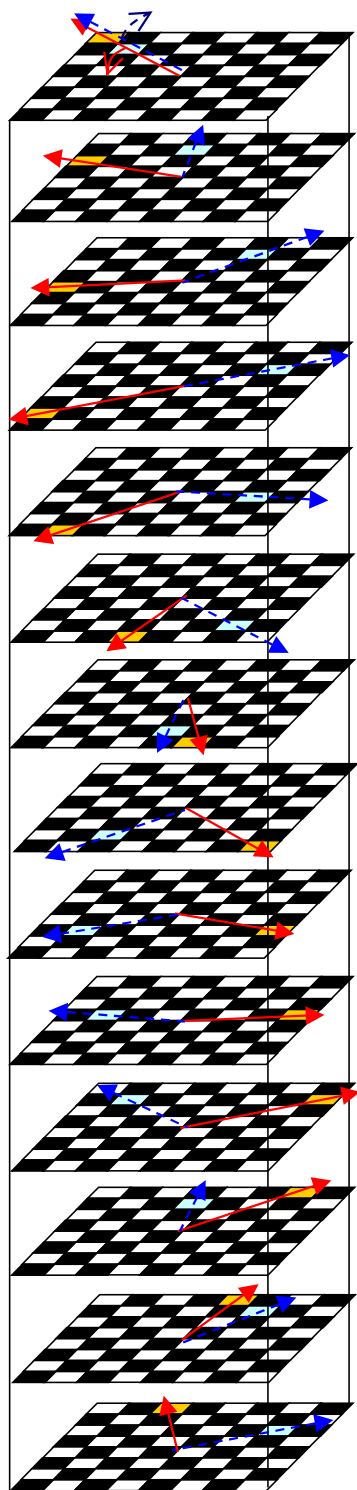
3. Активная часть входного сопротивления структуры слабо зависит от отношения L/λ .

4. При использовании метаструктуры с двумя директорами (рис.4,в) можно ещё более увеличить рабочий диапазон длин волн; при этом можно использовать свойства двухзаходных спиральных антенн [24].

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

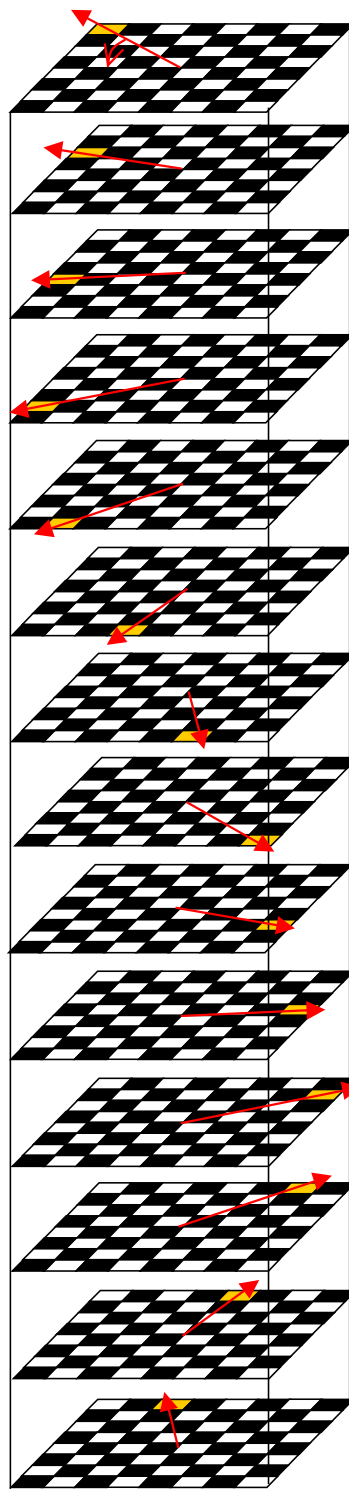
6. При одновременном использовании нескольких геометрически-киральных структур возможно создание решёток с уменьшенной шириной главного лепестка осевого излучения (переизлучения).

Двухдиректорная спиральная
киральная структура



а)

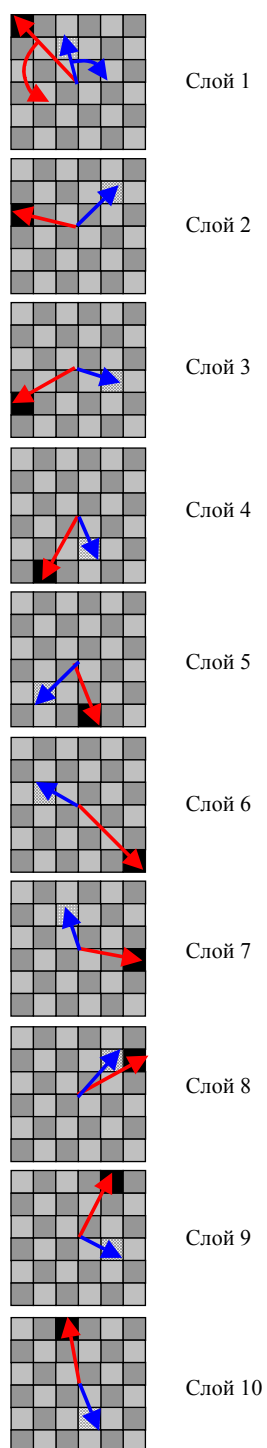
Однодиректорная спиральная
киральная структура



б)

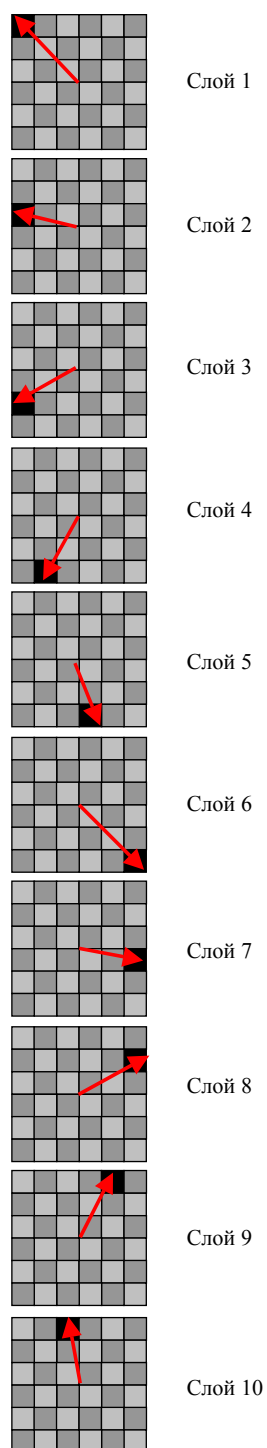
Рисунок 3 — Геометрически-киральные многослойные
метаструктуры с двумя и одним директором

Двухдиректорная спиральная
киральная структура



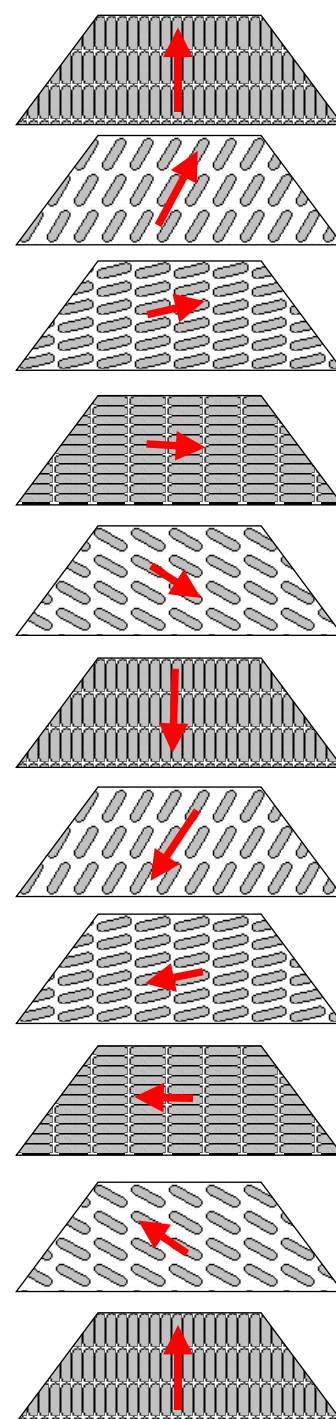
а)

Однодиректорная спиральная
киральная структура



б)

Холестерический
жидкий кристалл [1]



в)

Рисунок 4 — Виды слоев геометрически-киральных метаструктур с двумя (а) и одним (б) директором и естественного ХЖК (в)

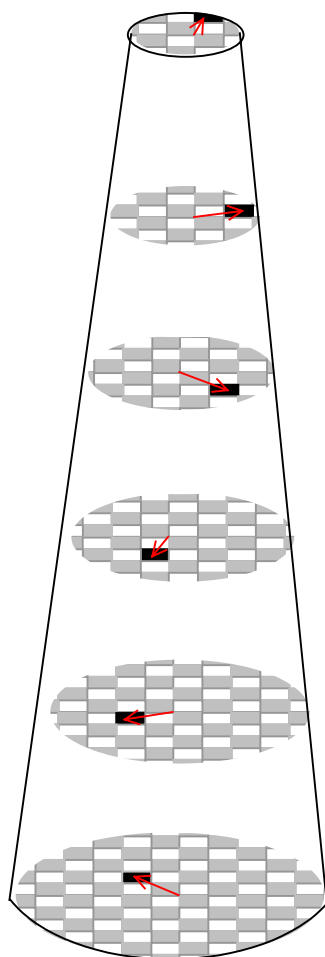


Рисунок 5 — Геометрически киральная метаструктура с одним директором и образующей поверхностью в виде конуса

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.

§4. Об использовании киральных многослойных метаструктур

На настоящий момент времени известно, что основные возможностью использования одно и многослойных киральных структур связаны с их частотно и поляризационно-селективными свойствами. В частности, в [25] говорится о возможности использования диэлектрического слоя с двухсторонней металлизацией поверхностей полосковыми киральными элементами в качестве частотно селективного защитного экрана от электромагнитного излучения. Частотный диапазон работы устройства определяется размерами киральных элементов и расстоянием между ними. Недостатком предлагаемого защитного экрана является резко выраженная частотная зависимость характеристик отражения и прохождения, связанная с использованием физически-

киральных элементов. По нашему мнению, возможно усовершенствование подобной структуры, связанное с заменой физически-киральных S-элементов на две зеркально отраженные геометрически-киральные плоскости (типа «chess-board» — по подобию шахматной доски). Здесь стоит ещё раз заметить, что при использовании геометрически-киральных структур частотная селективность устройств значительно уменьшается, так как пропадают резонансные микроэлементы. Геометрически-киральные структуры, скорее всего, могут стать основой нового поколения устройств для снижения видимости объектов.

В работе [26] рассмотрено отражение электромагнитной волны от плоского зеркала, образованного волнистой полосковой металлической структурой по форме напоминающей «чешую рыбы». В работе показано, что указанная структура выполняет роль зеркала, не изменяющего фазу электромагнитной волны при отражении. Такое поведение структуры позволяет отождествить её с материалом, обладающим показателем преломления, равным нулю.

В последнее время резко возрос интерес к исследованию нелинейных оптических эффектов в естественных киральных материалах, не обладающих центром симметрии (например, [27]). В связи с этим, следует ожидать, что и искусственные *геометрически-киральные структуры* могут проявлять нелинейные свойства, что приводит к возможности переизлучения полей широкого спектра, в том числе и на более низких частотах, включая инфранизкие электромагнитные поля, возникающие, согласно явлению возврата Ферми-Паста-Улама. Данные свойства структур вытекают также из явления образования прямых и обратных каскадов Ричардсона [28, 29].

Модели геометрически-киральных структур не исключают проявления ряда нелокальных эффектов, известных из теории квантовой физики (на примере Копенгагенской интерпретации квантовой механики, лауреата Нобелевской премии по физике — Нильса Бора) [30]. В структурах возможно возникновение волн, описываемых опережающими потенциалами, что, в свою очередь, приводит, например, к отрицательному времени отклика на воздей-

ствие. Согласно принципу дополнительности Бора, при возникновении набегающих волн возникает топология обратной проекции и возможность управления вероятностными процессами в матрице плотностей материальных событий пространственно-временного континуума в системе «наблюдатель – устройство (изделие) – материальная среда».

Указанные эффекты описываются теорией Юкавы виртуально-обменных процессов. Не фиксируемой до настоящего времени особенностью теории Юкавы является равновероятность процессов взаимодействия, не имеющих ориентации в пространстве и позиционирования во времени. Более того, именно потенциал Юкавы является определяющим для формирования привычного нам пространства и времени из взаимодействия когерентных элементов между собой, которыми в случае рассматриваемых нами изделий являются элементы 3D структур, что 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.

В заключение заметим, что 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.

Список использованных источников

1. Физический энциклопедический словарь / Под ред. *А.М. Прохорова*. — М.: Большая российская энциклопедия, 1995. — 928 с.
2. *Трапезов О.В.* Эволюционирующие системы левосторонне-асимметричны? // http://www.philosophy.nsc.ru/life/journals/philscience/2_96/05_trap.htm.
3. *Яшин А.А.* Четвертое измерение в конструктивной физике живого: эффекты киральности в биологии // Вестник новых медицинских технологий. — 2000. — Т. VII. — №2. — С. 50-55.
4. *Волькенштейн М.В.* Молекулярная оптика. — М.-Л.: Наука, 1951.
5. *Беляков В.А., Дмитриенко В.Е., Орлов В.П.* Оптика холестерических жидких кристаллов // Успехи физических наук, 1979. — Т. 127. — Вып. 2. — С.221-261.
6. *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов. — М.: Мир, 1977.
7. *Шевченко В.В.* Киральные электромагнитные объекты и среды // Соросовский образовательный журнал, 1998. — №2. — С.109-114.
8. *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.
9. *Каценеленбаум Б.З., Коршунова Е.Н., Сивов А.Н., Шамров А.Д.* Киральные электродинамические объекты // Успехи физических наук, 1997. — Т.167. — №11. — С.1201-1212.
10. *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.
11. *Третьяков С.А.* Электродинамика сложных сред: киральные, биизотропные и некоторые бианизотропные материалы // Радиотехника и электроника, 1994. — Т.39. — №10. — С.1457-1470.
12. *Неганов В.А., Осипов О.В.* Отражающие, волноведущие и излучающие структуры с киральными элементами — М.: Радио и связь, 2006. — 280с.
13. *Шевченко В.В.* Дифракция на малой киральной частице // Радиотехника и электроника, 1995. — Т.40. — №12. — С.1777-1788.
14. *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.
15. *Просвирнин С.Л.* Преобразование поляризации при отражении волн микрополосковой решеткой из элементов сложной формы // Радиотехника и электроника, 1999. — Т.44. — №6. — С.681-686.
16. *Prosvirnin S.L.* Analysis of electromagnetic wave scattering by plane periodical array of chiral strip elements // Proceedings of 7-th International Conference on Complex Media «Bi-anisotropic-98», 3-6 June 1998. — P.185-188.
17. *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.
18. *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.

19. *Lakhtakia A., Varadan V.V., Varadan V.K.* Scattering and absorption characteristics of lossy dielectric, chiral, nonspherical objects // *Appl. Optics*, 1985. — V.24. — №23. — P. 4146-4154.
20. *Lakhtakia A., Varadan V.V., Varadan V.K.* Field equations, Huygens's principle, integral equations, and theorems for radiation and scattering of electromagnetic waves in isotropic chiral media // *Journal of the Optical Soc. Of America*, 1988. — V.5. — №2. — P.175-184.
21. *Васильева Т.Д., Просвирнин С.Л.* Дифракция электромагнитных волн на плоской решетке из киральных полосковых элементов сложной формы // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*, 1998. — Т.1. — №4. — С.5-9.
22. *Prosvirnin S.L., Zheludev N.I.* Polarization effects in the diffraction of light by a planar chiral structure // *Physical Review E.*, 2005. — V. E71. — №3.
23. Свидетельство о регистрации и депонировании произведения — объекта авторских (смежных) прав №1100299. Полезные модели композитных киральных изделий для защиты от негативных факторов направленных физических и геофизических процессов естественного и искусственного происхождения / **Гаврилов В.Ю., Неганов В.А., Осипов О.В., Пряников И.В.** Приоритет от 07.02.2007. Зарегистрирован ООО «Юридическая фирма Городисский и Партнёры».
24. *Марков Г.Т., Сазонов Д.М.* Антенны / Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. — М.: «Энергия», 1975. — 528 с.
25. Пат. №2003109213/09 (009761). Селективное экранирующее покрытие для защиты от электромагнитного излучения / *Долбичкин А.А., Неганов В.А., Осипов О.В.* Приоритет от 01.04.2003.
26. *Fedotov V.A., Rogacheva A.V., Mladenov P.L., Prosvirnin S.L., Zheludev N.I.* Mirror that does not change the phase of reflected waves // *Applied physics letters*, 2006. — V. 88. — P.091119-1-091119-3.
27. *Ostroverkhov V., Ostroverkhova O., Petschek R.G., Singer K.D.* Optimization of the nonlinear optical response in chiral media // *Proc SPIE* 1558, 2001. — V. 1568.
28. *Ландау Л.Д., Лифшиц В.М.* Гидродинамика. — М.: Наука, 1988. — 733 с.
29. *Колесниченко А.В.* Синергетический подход к описанию стационарно-неравновесной турбулентности астро-геофизических систем (Москва, 2003) // <http://www.w3.org/TR/REC-html40>.
30. *Бор Н.* // *Квантовая физика и философия*, 1958. — №4.
31. Свидетельство о регистрации и депонировании произведения — объекта авторских (смежных) прав №1100300. Технология регистрации и трансляции информации о физических свойствах материальных объектов, основанная на специальном способе обработки кристаллов, полупроводников и др. активных сред / **Гаврилов В.Ю., Неганов В.А., Осипов О.В., Пряников И.В., Савранский В.В.** Приоритет от 07.02.2007. Зарегистрирован ООО «Юридическая фирма Городисский и Партнёры».

АННОТАЦИЯ ПО НАУЧНОМУ ПРОИЗВЕДЕНИЮ:

«Физически- и геометрически-киральные многослойные тонкослоистые метаструктуры»

Произведение относится к областям радиофизики, геофизики, квантовой физики, топологии 3D-структур, математической физики.

Целью настоящего произведения является создание полезных моделей (изделий) на основе сложных искусственных композитных 3D геометрически-киральных метаструктур, предназначенных для регистрации, поглощения и переизлучения электромагнитных волн и полей иного происхождения (в том числе, и в первую очередь, акустических полей) в длинноволновую область спектра. Принцип работы предлагаемых полезных моделей основан на вводимом авторами понятии геометрической киральности.

Новизна работы заключается в возможности конструирования и использования по заданным параметрам изделий, регистрирующих, поглощающих и переизлучающих электромагнитных и акустические поля в широких спектральных диапазонах от 10^{-3} Гц до 10^{10} Гц.

Предлагаемые изделия, в первую очередь, могут быть использованы для защиты систем управления, информационно-аналитических и других электронных систем от негативных факторов направленных физических и геофизических процессов естественного и искусственного происхождения, сопровождающихся выделениями энергии в виде электромагнитного излучения в инфранизкочастотной части спектра — до 10^{-3} Гц (смерчи, тайфуны, торнадо, морские цунами, ионо- и гидросферные коллективные процессы, ядерные взрывы при полигонных испытаниях и т.п.).

АВТОРЫ:

Гаврилов Владимир Юрьевич, Неганов Вячеслав Александрович, Осипов Олег Владимирович, Пряников Игорь Викторович, Савранский Валерий Васильевич

НАЗВАНИЕ НАУЧНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ:

«Физически- и геометрически-киральные многослойные тонкослоистые метаструктуры»

ПРОТОТИПЫ:

1. Свидетельство о регистрации и депонировании произведения — объекта авторских (смежных) прав — А - 177 от 23.06.2004.
2. Свидетельство о регистрации и депонировании произведения — объекта авторских (смежных) прав — №1100299 от 07.02.2007.
3. Свидетельство о регистрации и депонировании произведения — объекта авторских (смежных) прав — №1100300 от 07.02.2007.

ДАТА СОЗДАНИЯ НАУЧНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ: 01.06.2007

МЕСТО СОЗДАНИЯ НАУЧНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ:

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики (г. Самара) — кафедра основ конструирования и технологий радиотехнических систем.