

УДК 621.396.67

А.У. Касимова

*Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР, Бишкек,
Кыргызстан*

ИНТЕГРАЦИЯ КИРАЛЬНЫХ СТРУКТУР И МЕТАМАТЕРИАЛОВ В МИКРОПОЛОСКОВЫХ АНТЕННАХ: ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ

В работе представлен обзор современных исследований, посвящённых интеграции киральных структур и метаматериалов в микрополосковые антенны с целью улучшения их излучающих характеристик. Рассмотрены физические принципы киральности, включая круговой дихроизм, оптическая активность и электромагнитное спаривание, а также особенности взаимодействия киральных элементов с электромагнитными волнами. Проведён анализ существующих конструктивных решений, основанных на использовании киральных метаматериалов и бианизотропных сред, влияющих на диаграмму направленности, поляризацию и согласование антенн. Особое внимание уделено применению динамически управляемых киральных структур на основе пьезоэлектрических материалов, которые могут обеспечить адаптивное изменение параметров излучения в реальном времени. Работа направлена на систематизацию текущего состояния области применения киральных структур и формулирует теоретическое направление для дальнейших исследований и численного моделирования.

Ключевые слова: микрополосковая антенна, киральность, метаматериалы, бианизотропия, диаграмма направленности, поляризация, пьезоэлектрические материалы, адаптивные антенны.

Введение

В настоящее время известно большое разнообразие природных структур, отличающихся своеобразным строением и оптимальной функциональностью. Данные структуры являются объектами современных научных исследований, открывающими новые возможности в таких областях, как нанотехнологии, материаловедение, медицина и энергетика. Особое место занимают исследования киральных структур – объектов, не обладающих зеркальной симметрией. Иными словами, если такую структуру отразить в зеркале, то её отражение не совместится с оригиналом ни при каких вращениях и перемещениях в пространстве. Обобщая, можно констатировать, что киральность — это фундаментальное геометрическое свойство, которое проявляется в самых разных масштабах: от молекул (например, аминокислоты) до макроскопических инженерных объектов, таких как антенны и метаматериалы [1].

Благодаря своей асимметрии киральные структуры обладают уникальными физическими, химическими и оптическими свойствами, что делает их перспективными для применения в наноразмерных полупроводниках, дисплеях, антеннах и других передовых технологиях.

Физические основы киральности

Физическое значение киральности проявляется при взаимодействии структуры с волновыми процессами, включая электромагнитное, акустическое и другие виды излучения. Взаимодействие электромагнитной волны с киральной структурой приводит к асимметричному отклику для лево- и правополяризованных составляющих волны. Это различное взаимодействие с циркулярно поляризованным излучением является определяющей характеристикой киральности в волновой физике.

Оптическая активность представляет собой ключевое проявление взаимодействия киральных молекул с электромагнитным полем. При прохождении линейно поляризованного излучения (включая радиоволны) через киральную среду наблюдается вращение плоскости поляризации. Этот эффект обусловлен различной рефракцией левой и правой циркулярно поляризованных компонент излучения в киральной среде. Различие в фазовых скоростях этих компонент приводит к их интерференции на выходе из среды, что и вызывает поворот плоскости поляризации.

Киральность приводит к явлению кругового дихроизма, когда киральное вещество по-разному поглощает свет с левой и правой круговой поляризацией. Это проявляется в том, что амплитуда света с разной круговой поляризацией изменяется по-разному при прохождении через киральный материал. Например, свет с правой круговой поляризацией может быть поглощен сильнее, чем свет с левой круговой поляризацией. Данный эффект используется в поляризационных фильтрах и датчиках, чувствительных к поляризации.

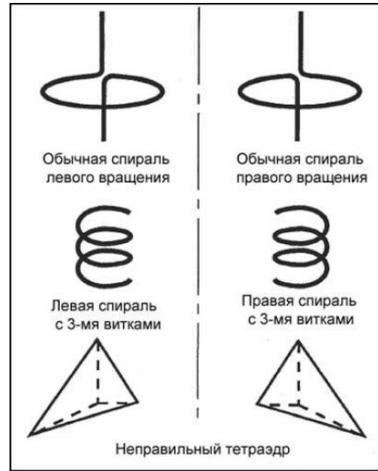


Рисунок 1 – Некоторые примеры киральных объектов

С точки зрения инженерии киральные структуры демонстрируют особенное явление – электромагнитное спаривание. В стандартных, несинхронизированных системах электрическое поле стимулирует исключительно электрический диполь, а магнитное – магнитный [1]. В отличие от них в киральных элементах наблюдается взаимное возбуждение: электрическое поле способно инициировать магнитный отклик, а магнитное – электрический. Данный эффект моделируется бианизотропной средой, за счет чего в уравнениях Максвелла появляются новые члены. Ключевую роль здесь играет киральный параметр χ , характеризующий интенсивность этого перекрёстного воздействия.

Распространение электромагнитных волн в киральной среде, не обладающей зеркальной симметрией, требует использования соотношений, отражающих взаимосвязь между электрическими и магнитными полями. Взаимосвязь полей выражается в зависимости электрической индукции D от магнитного поля H , а также магнитной индукции B от электрического поля E [2]. Опять же это связано с тем, что киральная структура не обладает зеркальной симметрией. С учетом эффекта киральности уравнения принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} D &= \varepsilon_0 \varepsilon_r E + \chi H, \\ B &= \mu_0 \mu_r H + \chi E, \end{aligned} \tag{1}$$

где ε и μ — диэлектрическая и магнитная постоянные вакуума соответственно, ε_r и μ_r — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, χ — коэффициент киральности, характеризующий степень связи между E и H .

Анизотропия является характерной чертой киральных элементов. Это проявляется в том, что их электромагнитный отклик чувствителен к направлению распространения, углу падения и ориентации электромагнитной волны. В качестве примера можно привести спираль, чья реакция на электромагнитное излучение будет различной в зависимости от направления распространения волны относительно оси спирали. Эта анизотропия делает киральные элементы ценными строительными составляющими для метаматериалов,

искусственно созданных структур, чьи свойства определяются не составом, а их внутренней геометрией и взаимодействием между элементами [1,2].

Современные антенные технологии демонстрируют тесную связь между киральностью и метаматериалами, однако эти понятия не являются тождественными. Метаматериалы, как было сказано выше, – это искусственно созданные среды, чьи электромагнитные свойства определяются геометрией и конфигурацией их структурных элементов. Киральность в свою очередь является фундаментальным геометрическим свойством структурных элементов, характеризующихся отсутствием зеркальной симметрии. При интеграции киральных элементов и метаматериалов свойства последних значительно расширяются за счет возникновения бианизотропных эффектов, таких как перекрёстный отклик между электрическим и магнитным полями, круговой дихроизм и оптическая активность.

Таким образом, киральность является одним из способов генерации метаматериальных свойств. Иными словами, метаматериал, у которого структурные элементы обладают киральной геометрией, приобретает характеристики, невозможные для симметричных структур. К примеру, широко используемые SRR-ячейки в классическом представлении являются симметричными и создают метаматериальные свойства за счет резонансного отклика. Но при нарушении симметрии, например при пространственном повороте, они становятся киральными включениями. При таком подходе формируется киральный метаматериал, обладающий резонансными эффектами и возможностью управления поляризацией электромагнитного излучения, что приводит к расширению функциональности антенных структур.

Фактически киральные метаматериалы являются периодическими структурами, построенными из метаатомов, обладающих геометрической киральностью. Эта киральность приводит к тому, что при облучении электромагнитной волной в метаатомах возникают как электрические, так и магнитные дипольные моменты, даже если изначально возбуждается только один из этих типов. Это «перекрёстное» возбуждение диполей сильно меняет электромагнитные свойства материала, приводя к аномальным эффектам, таким как отрицательное преломление для одной из круговых поляризаций, сильный круговой дихроизм и оптическая активность [3]. Эти эффекты описываются тензорами диэлектрической проницаемости и магнитной восприимчивости, а также параметром киральности. Благодаря возможности управления этими параметрами киральные метаматериалы перспективны для создания устройств управления волновым фронтом, поляризаторами и других оптических и радиочастотных компонентов. Они используются в антеннах, сенсорах и фотонных кристаллах, открывая новые возможности для миниатюризации и улучшения характеристик устройств.

В прикладной электродинамике киральные метаматериалы благодаря их уникальной способности к управлению поляризацией электромагнитного излучения играют ключевую роль в создании различных функциональных устройств. В частности, в антенных технологиях они используются для прецизионного формирования и контроля поляризационного состояния излучаемого сигнала. Киральные элементы позволяют реализовать подавление паразитных отражений, блокировку обратного распространения волн и селективное формирование круговой поляризации (правой или левой). Последнее особенно критично в системах связи с подвижными объектами, таких как спутниковые и аэрокосмические системы, где требуется устойчивый приём сигнала независимо от ориентации антенны.

Интеграция киральных элементов в фазированные антенные решётки (ФАР) позволяет достичь высокой степени контроля над амплитудно-фазовым распределением поля, что необходимо для точного формирования диаграммы направленности. Благодаря асимметричной геометрии и способности индуцировать перекрёстные электромагнитные отклики киральные метаатомы обеспечивают пространственно-зависимую фазовую модуляцию, чувствительную к углу падения и поляризации входящего сигнала. Это

делает их перспективными для создания адаптивных антенн с высокой степенью функциональной гибкости [4].

Свойства киральных элементов выходят за рамки простой геометрии и являются результатом сложных физических механизмов, связанных с неинвариантным взаимодействием электромагнитных волн с искусственно созданными средами. Исследование и применение этих эффектов открывают новые возможности для разработки высокопроизводительных радиочастотных и фотонных устройств, включая устройства с возможностью активного управления характеристиками в реальном времени.

Киральные метаматериалы в антеннах

В области развития микрополосковых антенн (МПА) значительный интерес вызывает использование фокусирующих метаповерхностей, которые способны значительно повысить качество направленности излучения. Метаповерхности представляют собой двумерные структуры, состоящие из искусственно созданных элементов, позволяющих контролировать фазу, амплитуду и поляризацию электромагнитных волн. Эти конструкции могут функционировать как отражатели, а также применяются для создания передающих фазированных решеток, обеспечивающих изменение формы волнового фронта в пространстве.

Использование фокусирующих метаповерхностей в сочетании с микрополосковыми антеннами (МПА) позволяет существенно улучшить их характеристики излучения. Современные исследования демонстрируют увеличение коэффициента усиления на 5-10 дБ и сужение главного лепестка диаграммы направленности. В работе [5] представлена конструкция двухполяризованной антенны с метаповерхностью, работающей на частоте 13,7 ГГц, которая обеспечивает усиление до 14,8 дБ и высокую симметрию диаграммы направленности. Данный подход особенно перспективен для разработки компактных антенн миллиметрового диапазона, где требуется высокая направленность излучения при ограничениях на габариты.

Метаповерхности, применяемые для фокусировки излучения, обеспечивают компенсацию потерь усиления, возникающих при использовании антенн с нестандартной геометрией (гибких, изогнутых) или уменьшенными размерами. Данная технология представляет интерес для интеграции в носимую электронику, беспилотные летательные аппараты и спутниковые системы, где необходимы компактность и эффективность.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в использовании микрополосковых антенн для создания сенсоров, способных реагировать на изменения окружающей среды. Это открывает новые возможности для мониторинга влажности, температуры и концентрации веществ благодаря интеграции антенных технологий, радиочастотной идентификации (RFID) и радиочастотных датчиков.

Работа антенного сенсора основана на принципе резонанса. В этом случае изменение диэлектрической проницаемости или магнитной восприимчивости материала, окружающего антенну, приводит к сдвигу резонансной частоты антенны, а также к изменению амплитуды отраженного сигнала или фазовому сдвигу. Подложка или надслой антенны играют роль чувствительного элемента, реагирующего на эти изменения. Оптимизация конструкции и материалов антенны позволяет создавать высокочувствительные и селективные сенсоры, способные обнаруживать даже незначительные изменения в параметрах окружающей среды.

В работах [6-9] отмечается, что антенны, интегрированные с метаматериальными структурами (например, SRR), обладают повышенной чувствительностью к изменениям влажности и биологических параметров. Это является существенным преимуществом по сравнению с обычными антеннами. Параллельно ведутся разработки гибких сенсорных антенн на полимерных подложках, которые сохраняют функциональность при изгибе и деформации, что открывает возможности для их использования в биомедицинских приложениях.

Таким образом, в современных условиях микрополосковые антенны являются не просто передающими или приёмными элементами — они интегрируются в состав многофункциональных интеллектуальных систем, играя активную роль в сборе, обработке и передаче информации. За счет своих компактных размеров, высокой эффективности и простоте интеграции с другими электронными компонентами, такие антенны становятся незаменимыми в архитектуре интернета вещей (IoT), системах беспроводного мониторинга окружающей среды и биометрических параметров, а также в устройствах носимой электроники, где в приоритете миниатюризация, энергоэффективность и надёжность связи.

Физические свойства киральных элементов обуславливают нелинейный отклик на электромагнитное поле. Наблюдаемая сильная оптическая активность, дихроизм и электромагнитное спаривание делают эти структуры перспективными для применения в радиочастотных и антенных технологиях. Интеграция киральных элементов в микрополосковые антенны позволяет осуществлять контроль над характеристиками излучения.

Микрополосковые антенны благодаря своим преимуществам в виде малых габаритов, плоской конфигурации и технологичности широко используются в беспроводных системах связи, радиолокации и спутниковых комплексах [10]. Несмотря на это, классические микрополосковые антенны характеризуются ограниченным усилением, а также сложностями в управлении поляризацией и направленностью излучения. В связи с этим перспективным направлением является модификация микрополосковых антенн с применением функциональных материалов и метаструктур, в частности, киральных элементов, для улучшения их характеристик.

Добавление киральных структур в микрополосковые антенны обычно достигается посредством добавления слоя или регулярного массива киральных элементов рядом с излучающей поверхностью – чаще всего под диэлектрической подложкой или между подложкой и заземляющим слоем. Данный подход позволяет изменять локальные электромагнитные характеристики в области формирования и распространения сигнала. Киральные элементы благодаря своей внутренней асимметрии и разному воздействию на волны с правой и левой круговой поляризацией создают дополнительное изменение фазы, что сопровождается поляризационно-зависимым изменением формы электромагнитного поля. Это взаимодействие вызывает перераспределение энергии излучения, преобразование формы направленности, потенциальное смещение главного лепестка, ослабление боковых лепестков или даже выборочное увеличение мощности излучения в заданном направлении. Такие возможности делают использование киральных структур многообещающим способом регулировки параметров антенн без механического регулирования или изменения формы основной излучающей части.

Вследствие кругового дихроизма киральный слой может также избирательно усиливать или ослаблять компоненты излучения определённой поляризации, что особенно важно при разработке антенн с круговой поляризацией или адаптивных антенн, способных автоматически изменять характеристики под внешние условия [1]. Кроме того, за счёт перекрёстного электромагнитного отклика (бианизотропии) возможно влияние на распределение тока в патче, что, в свою очередь, сказывается на ширине полосы согласования, положении резонансной частоты и коэффициенте отражения.

Численные эксперименты с моделированием подобных конструкций в микроволновом диапазоне демонстрируют, что даже незначительный киральный слой с толщиной, составляющей малую часть длины волны, способен значительно изменить параметры антенны. Таким образом, интеграция киральных элементов в микрополосковую антенну дает возможность управления ее излучающими характеристиками на структурном уровне, избегая сложной геометрии излучателя или использования активных элементов.

Интеграция в микрополосковые антенны

Перспективным направлением является разработка антенн с использованием динамически перестраиваемых киральных метаматериалов. Изменяя параметры киральных элементов под воздействием внешних факторов, таких как электрическое поле или температура, можно добиться адаптивного управления характеристиками антенны в режиме реального времени. Это открывает возможности для создания интеллектуальных антенных систем, способных автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия окружающей среды и требования пользователя.

Одной из первых теоретически обоснованных трудов по моделированию микрополосковых антенн на киральной подложке является статья Клюева Д.С. и Нещерета А.М. [11], в которой предложен математически строгий электродинамический метод к анализу распределения токов на плоскости микрополоскового вибратора, расположенного на киральной диэлектрической структуре. В этой работе учтены пространственная дисперсия среды, характеристики распространения волн с круговой поляризацией и отражение с изменением поляризации, свойственные для киральных материалов.

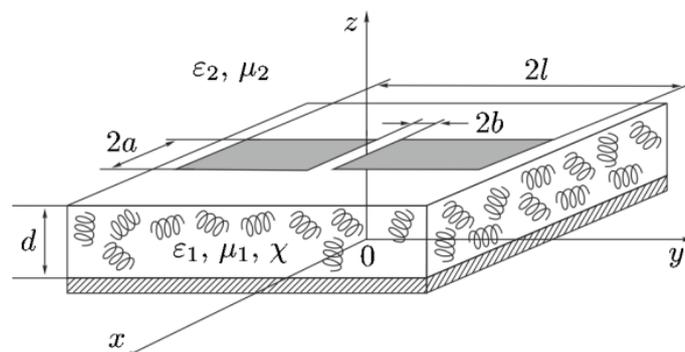


Рисунок 2 – Геометрия микрополосковой антенны с киральной подложкой [11]

Авторам удалось получить сингулярное интегральное уравнение с особенностью Коши, которое моделирует продольное распределение тока на поверхности вибратора. Уравнение учитывает свойства подложки, зависящие от коэффициента киральности χ , и точно отражает граничные условия и конструкцию антенны. Данный подход обеспечивает высокую точность определения численного значения входного импеданса и формируемой антенной диаграммы направленности.

Авторы обнаружили, что применение киральной подложки оказывает существенное влияние на свойства излучения: в результате возбуждаются эллиптически поляризованные волны, а также наблюдается смена резонансной частоты. Такой подход позволяет изменять поляризацию и форму излучения, регулируя параметры среды, без необходимости изменять геометрию самой антенны. Исследования Клюева и соавторов дали основу для дальнейших научных направлений в области объединения микрополосковых структур с киральными метаматериалами.

В работе [12] рассматриваются характеристики усиления микрополосковых патч-антенн, покрытых киральными метаматериалами. Для определения влияния таких структур на характеристики антенн авторы провели численное моделирование, в рамках которого сравнивались параметры отражения (S_{11}) и диаграммы направленности антенн с киральным слоем и без него. На основе полученных результатов авторы сделали вывод, что использование киральных структур приводит к увеличению усиления, улучшению диаграммы направленности или одновременно обоих параметров на рабочей частоте. Так, при использовании первой киральной структуры амплитуда главного лепестка диаграммы направленности увеличилась с 11,3 дБ до 11,6 дБ. Вторая киральная структура способствовала снижению коэффициента отражения S_{11} с -13,57 дБ до -15,71 дБ, что соответствует улучшению на 1,97 дБ. Полученные результаты говорят о том, что

микрорешетчатые патч-антенны, покрытые киральными метаматериалами, являются перспективными для применения в радиочастотных и антенных системах, требующих улучшенных характеристик излучения.

В работе [13] авторы показали, что использование бианизотропной подложки с киральными и гиромангнитными свойствами позволяет управлять резонансной частотой и импедансным согласованием микрорешетчатой антенны. Авторы отметили, что при увеличении параметра киральности существенно уменьшается уровень отражения и изменяется распределение излучения. Это демонстрирует перспективность интеграции таких структур в антенны с дополнительными резонаторными элементами для повышения эффективности и управляемости.

В работе [14] автор рассматривает применение киральных метаматериалов в антенных радиотехнических системах космических аппаратов с целью улучшения их характеристик. Автором была рассмотрена интеграция проводящих спиральных включений в подложку антенны, что приводило к созданию киральной среды, позволяющей уменьшить размеры антенны и изменить ее электродинамические свойства. В частности, автор описал две киральные среды – биизотропная и бианизотропная. В качестве примера было рассмотрено моделирование двухзаходной конической логоспиральной антенны. Результаты моделирования показали, что антенна с киральным заполнением имеет меньшую резонансную частоту, обладает лучшим согласованием и широкой полосой частот, а также демонстрирует высокий коэффициент усиления при сохранении направленности. Рассмотренная конструкция рекомендована к применению в космических системах, а также в автоматической идентификации судов, где преимуществом являются малые габариты и круговая поляризация.

В работе [15] исследуется взаимодействие электромагнитных волн с киральной средой, в частности — безотражательное прохождение волн через слой такой среды, включая случаи, когда диэлектрическая проницаемость отрицательна (непрозрачная плазма). На основе точных аналитических решений уравнения Гельмгольца авторами показано, что благодаря киральности возможен эффект просветления, то есть прохождения волны через слоистую или сильно неоднородную среду без отражения. Особое внимание уделено гибридным модам с круговой поляризацией, описываемым в киральной среде преобразованными уравнениями Максвелла и связанными полями E , H , D , B . Авторами были рассмотрены как однородные, так и неоднородные слои, включая варианты с отрицательной диэлектрической проницаемостью на основе точного аналитического решения уравнения Гельмгольца. Для описания поведения волн в киральной среде были использованы стандартные соотношения для биизотропной киральной среды:

$$B = H - i\chi E, D = i\chi H + (\varepsilon + \chi^2)E. \quad (2)$$

С учетом этих выражений и уравнений Максвелла авторами была получена система, описывающая распространение электромагнитной волны с круговой поляризацией в киральной среде. Система может быть сведена к основному уравнению Гельмгольца в следующем виде:

$$\frac{d^2 F}{d\xi^2} + (\varepsilon + \chi^2)F = 0, \quad (3)$$

где $\xi = \frac{\omega z}{c}$ – безразмерная координата, $F(\xi)$ – модифицированная амплитуда поля.

Особое внимание выделено зависимости волнового числа от координаты. Волновой вектор $p(\xi)$ удовлетворяет следующему нелинейному уравнению:

$$\frac{p_{\xi\xi}}{2p} - \frac{3}{4}\left(\frac{p_{\xi}}{p}\right)^2 + p^2 - \varepsilon_{ef} = 0, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{ef} = \varepsilon + \chi^2$.

Это уравнение дает возможность подбирать неоднородные профили среды, обеспечивающие прохождение электромагнитной волны без отражения через слоистые и непрозрачные участки. Кроме того, если киральная среда представляет собой метаматериал со спиральными включениями, эффективные параметры ε и χ можно оценивать по формулам, полученным в модели Максвелла-Гарнетта:

$$\varepsilon(f) = \varepsilon_c + \frac{\beta_0^2}{4\pi^2(f_0^2 - f^2)}, \quad (5)$$

$$\chi(f) = \frac{A_0\beta_0^2 f}{2\pi c(f_0^2 - f^2)}, \quad (6)$$

где ε_c — проницаемость матрицы, f_0 — резонансная частота спирального включения, A_0 — расстояние между включениями, β_0 — параметр, связанный с геометрией включений, f — частота, c — скорость света.

Таким образом, приведенные в работе [15] уравнения и модели киральной среды служат основой для построения эффективных подложек антенн с целью уменьшения отражений, смещения резонанса и миниатюризации конструкций с заданными характеристиками.

На основании проведённого обзора и анализа существующих способов усиления параметров микрополосковых антенн можно сделать вывод, что объединение их с метаматериалами (резонансными ячейками) и киральными средами представляет собой перспективное направление в повышении эффективности антенн. В работе [16] автором рассматривался способ оптимизации микрополосковой конструкции путём введения ячеек-резонаторов (CSSR - ячеек), что позволило существенно улучшить характеристики антенны. В частности, было достигнуто снижение коэффициента отражения, увеличение усиления и формирование более направленной диаграммы. Такой подход обеспечивает эффективную оптимизацию конструкции без необходимости изменения её габаритов, что особенно актуально для компактных СВЧ-устройств.

Вместе с тем, согласно результатам анализа работ [2–4, 11–15], добавление киральных структур в подложку антенны оказывает влияние на фазовую скорость распространения, поляризационные характеристики и распределение поверхностных токов. Это открывает возможность дополнительной настройки параметров антенны, в том числе: управления диаграммой направленности, подавления кросс-поляризационных излучений и улучшения миниатюризации.

Можно рассмотреть возможность интеграции киральных элементов в исследованную конструкцию микрополосковой антенны с резонаторными ячейками (CSSR), геометрия которой была рассмотрена в работе [16]. Под киральными элементами в данном контексте понимаются включения с зеркально-асимметричной геометрией (например, правовинтовые спирали или асимметричные SRR-структуры), формирующие эффективную киральную подложку. Такая интеграция может привести к появлению дополнительного механизма управления электромагнитным откликом антенны за счёт изменения фазовых условий и дисперсионных характеристик среды. Предлагаемое преобразование конструкции не нарушает принципов планарного исполнения и может быть реализована с использованием существующих технологий.

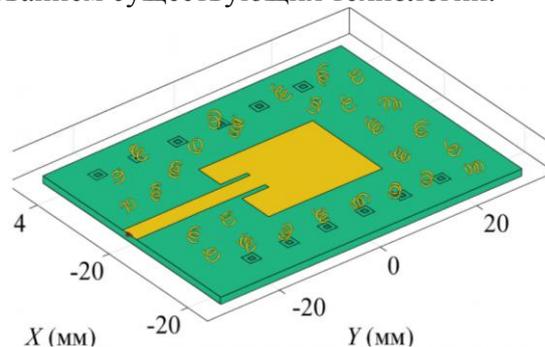


Рисунок 3 – Пример интеграции киральных элементов и микрополосковой антенной с CSSR- ячейками.

Перспективы и предложения

Как показано в приведённом выше обзоре, интеграция киральных структур с микрополосковыми антеннами позволяет существенно расширить возможности управления поляризацией, резонансными частотами и диаграммами направленности без изменения геометрии антенны. Однако большинство описанных конструкций являются пассивными, то есть параметры киральной среды фиксированы и не могут быть изменены в реальном времени.

В связи с этим возникает интерес к разработке активных или управляемых киральных структур, способных адаптироваться к внешним воздействиям. Одним из возможных перспективных решений является использование пьезоэлектрических материалов, обладающих возможностью деформации под действием электрического поля. При определенной геометрической реализации (например, в форме спиральных или асимметричных структур) такие материалы могут одновременно выполнять функции киральных включений и перестраиваемых управляющих элементов, тем самым формируя основу для получения адаптивных микрополосковых антенн с изменяемыми параметрами излучения.

Пьезоэлектрические материалы, такие как кварц, PVDF (поливинилиденфторид) или PZT (цирконат-титанат свинца), обладают способностью изменять свою форму и диэлектрические характеристики под воздействием электрического поля. Это свойство уже используется в радиочастотной технике для частотной подстройки и миниатюризации СВЧ-устройств. Так, например, в работе [17] описана микрополосковая антенна с подложкой из кварца, демонстрирующая сдвиг резонансной частоты до 55 МГц при приложении высоковольтного сигнала. В других работах использовались тонкие слои PVDF для широкополосной подстройки антенн с изменяемой диэлектрической проницаемостью.

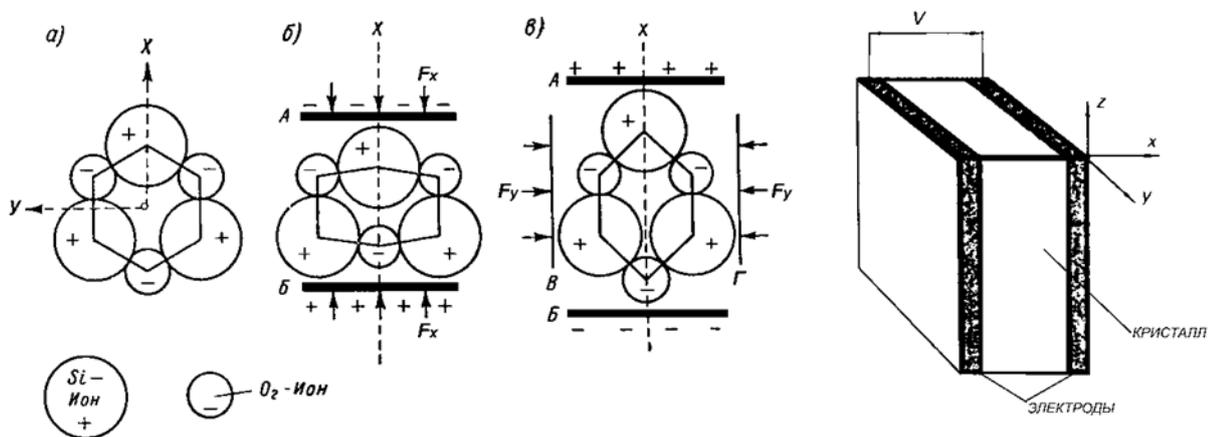


Рисунок 4 – Принцип работы пьезоэлектрического элемента.

Большой интерес представляет перспектива совмещения пьезоэффекта с геометрически киральными структурами. В случае, если пьезоэлемент реализован в виде асимметричного или спирального включения, его деформация может вызывать изменение эффективной киральности среды. Это позволяет создать управляемые киральные метаматериалы, способные изменять параметры поляризации, направленности и осуществлять соответствующее согласование антенны в реальном времени.

Несмотря на то, что в современной научной литературе отсутствуют работы, напрямую объединяющие пьезоэлектрические и киральные эффекты в составе микрополосковых антенн, проводимые исследования по пьезометаматериалам и

адаптивным антеннам позволяют считать это направление весьма перспективным для дальнейшего изучения. Теоретически такие конструкции могут обеспечить синергетическое управление полем за счёт комбинации локальной геометрической анизотропии и внешнего пьезоуправления.

Заключение

В данной работе представлен обзор современных подходов к оптимизации микрополосковых антенн с использованием метаматериалов, включая резонаторные ячейки, киральные элементы и фокусирующие метаповерхности. Особое внимание уделено интеграции киральных свойств в конструкцию антенн, что позволяет расширить функциональные возможности устройства без увеличения его габаритов. Исследования показывают, что применение киральных подложек способствует снижению взаимного влияния между элементами массива, улучшению согласования и управлению поляризационными характеристиками излучения.

Дополнительно обосновывается возможность перспективного использования пьезоэлектрических материалов в качестве активных управляющих элементов в конструкции микрополосковых антенн. При соответствующей геометрической реализации пьезоэлементы могут одновременно выполнять функции киральных включений и средств для динамической перестройки электродинамических параметров антенны. Несмотря на отсутствие реализованных конструкций, объединяющих пьезоэффект и киральность в рамках единой антенной системы, теоретические предпосылки и предварительные исследования в смежных областях свидетельствуют о высоком потенциале такого подхода.

В результате проведенного анализа было предложено относительно новое направление для дальнейших исследований, заключающееся в моделировании и экспериментальной реализации микрополосковых антенн с пьезокиральной подложкой. Подобная модификация может обеспечить управляемое согласование, адаптивную поляризацию и направленное излучение, что особенно актуально для современных телекоммуникационных систем, ММО устройств и интеллектуальных сенсоров.

Литература:

1. Боголюбов А.Н., Мосунова Н.А., Петров Д.А. Математическое моделирование киральных волноведущих антенн // Журнал радиоэлектроники. – 2005. – №7. – С. 3–24.
2. Марценюк Михаил Андреевич, Фуфачев Михаил Андреевич. Параметризация киральности и оптическая активность нанокompозитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2013. – №2 (170). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/parametrizatsiya-kiralnosti-i-opticheskaya-aktivnost-nanokompозитov>.
3. Шевченко В.В. Киральные электромагнитные объекты и среды // Соровский образовательный журнал. – 1998. – № 2. –С. 109–114.
4. Панин Дмитрий Николаевич, Осипов Олег Владимирович. Неоднородные киральные метаматериалы: анализ отражения оптических волн с учетом дисперсии материальных параметров // КО. 2024. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neodnorodnye-kiralnye-metamaterialy-analiz-otrazheniya-opticheskikh-voln-s-uchetom-dispersii-materialnyh-parametrov>.
5. Сан, Ю.; Кай, Б.; Ян, Л.; Ву, Л.; Ченг, Ю.; Луо, Х.; Чен, Ф.; Ли, Х. Микрополосковая антенна с двойной поляризацией и высоким коэффициентом усиления на основе метаповерхности, фокусирующей пропускание. –Материалы 2024, 17, 3730. <https://doi.org/10.3390/ma17153730>.

6. Стаценко Л.Г., Смирнова М.М., Север Д.С., Дронин Я.С. Применение метаматериалов в антенных устройствах цифровых систем связи. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.2>.
7. Хамед Ебрахим Абдо Махьюб, Кисель Наталья Николаевна Оценка эффективности применения метаматериала в разработках микрополосковых антенн на основе LTCC-технологии // Известия ЮФУ. – Технические науки. – 2019. – №3 (205). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-primeneniya-metamateriala-v-razrabotkah-mikropoloskovykh-antenn-na-osnove-ltcc-tehnologii>.
8. Хамед Ебрахим Абдо Махьюб, Кисель Наталья Николаевна. Исследование характеристик микрополосковой антенны с управляемым метаматериалом // Известия ЮФУ. – Технические науки. – 2019. №3 (205). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-harakteristik-mikropoloskovoy-antenny-s-upravlyаемым-metamaterialom>.
9. Мусаев Максуд Мурад Оглы, Кисель Наталья Николаевна. Исследование характеристик антенны на основе метаматериала // Известия ЮФУ. – Технические науки. – 2017. – №6 (191). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-harakteristik-antenny-na-osnove-metamateriala>.
10. Касимова А.У. Сравнительный анализ моделирования микрополосковой антенны в программах CST Microwave Studio и Matlab Antenna Toolbox // Проблемы автоматизации и управления.–2022.–№ 3(45).– С. 31– 41.
11. Ключев Дмитрий Сергеевич, Нещерет Анатолий Михайлович. Сингулярное интегральное уравнение для расчета микрополоскового вибратора, расположенного на киральной подложке // Евразийский союз ученых. –2015. – №5–7 (14). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/singulyarnoe-integralnoe-uravnenie-dlya-rascheta-mikropoloskovogo-vibratora-raspolozhennogo-na-kiralnoy-podlozhke>.
12. Mehmet BAĞMANCI, Muharrem KARAASLAN, Emin UNAL, Faruk KARADAG, Microstrip Patch Antennas Covered with Chiral Metamaterial Structures // Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture, 33(3), pp. 245-254, September 2018
13. Zebiri C., Lashab M., Benabdelaziz F. Rectangular microstrip antenna with uniaxial bi-anisotropic chiral substratesuperstrate // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. – 2011. – Т. 5, № 1. – С. 17–29. – DOI: 10.1049/iet-map.2009.0446
14. Филиппов, С. Б. Исследование эффективности применения киральных метаматериалов в конструкциях антенн радиотехнических систем космических аппаратов / С. Б. Филиппов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2020. – Т. 7. – Выпуск 2. – С. 33–38. – DOI 10.30894/issn2409-0239.2020.7.2.33.38. URL: https://spacedevice.ru/wp-content/uploads/2020/07/4_p33_0702.pdf
15. Гах Г.В., Ерохин С.Н. Безотражательное прохождение электромагнитной волны через слой киральной среды / Г.В. Гах, С.Н. Ерохин // ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6). – 2008. – №4. – С. 119–122.

16. Верзунов, С. Н. Способ оптимизации конструктивных параметров ячеек-резонаторов микрополосковых антенн на основе интеллектуального анализа данных / С. Н. Верзунов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2022. – № 3(56). – С. 54–64. – DOI 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-54-64. – EDN GBBNJP.
17. Microstrip patch antenna using piezoelectric substrates, пат. WO 2005050784 A1. – 2005. – Международная заявка № PCT/US2004/039550; заявл. 24.11.2004; опубл. 02.06.2005.