

Лекция 4. Метаматериалы

В настоящее время большой интерес вызывает применение в радиофизике, акустике и ряде других областей метаматериалов, с помощью которых возможно создание систем и устройств с уникальными свойствами. В частности значительный интерес представляет создание систем, использующих свойства бианизотропных и киральных (гиротропных) сред.

Поле в среде описывается системой уравнений Максвелла, которая учитывая временную зависимость в виде $e^{-i\omega t}$, имеют вид:

$$\operatorname{rot}\vec{H} = -i\omega\vec{D} + \vec{j};$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = i\omega\vec{B};$$

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0;$$

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho.$$

Система уравнений Максвелла содержит 8 скалярных уравнений и 12 неизвестных – поэтому она недоопределена. К этой системе необходимо добавить **материальные уравнения** – линейные соотношения, связывающие векторы электромагнитного поля. В общем виде эти соотношения имеют вид:

$$\vec{D} = a_{11}\vec{E} + a_{12}\vec{H},$$
$$\vec{B} = a_{21}\vec{E} + a_{22}\vec{H},$$

где материальные параметры a_{ij} , $i, j = 1, 2$ некоторые величины (в общем случае диадные функции частоты). Такие линейные среды общего вида называются **бианизотропными**. В **биизотропных** средах материальные уравнения являются скалярами или псевдоскалярами. **Взаимная биизотропная** среда характеризуется тремя комплексными материальными параметрами параметрами ϵ , μ , χ - **диэлектрической проницаемостью, магнитной проницаемостью и параметром киральности**. Параметр киральности отличен от нуля только в средах, называемых **киральными**, которые **содержат элементы, обладающие зеркальной симметрией**. При стремлении параметра киральности к нулю среда вырождается в диэлектрик или магнетик. Итак, **изотропная киральная среда является частным случаем бианизотропной среды**.

При рассмотрении электромагнитной модели обычной (некиральной) среды полагают, что она описывает свойства сплошной среды. **Киральные же свойства связаны с проявлением дискретной структуры среды.** Киральный параметр χ пропорционален отношению a/λ , где a — линейный размер частицы — элемента среды, λ — длина волны. Если a/λ стремится к нулю, киральные свойства среды исчезают. **Учет киральных свойств означает учет влияния «крупинки» среды или пространственной дисперсии.** В оптике естественных сред значение отношения a/λ оказывается порядка $10^{-3} - 10^{-4}$, вследствие чего оптическая активность в естественных средах и не нашла своего применения из-за малости эффекта. Исключением можно считать только **жидкие кристаллы.** С развитием новых технологий в производстве искусственных электромагнитных сред величину $\chi = Ca/\lambda$ удалось значительно увеличить. В этом случае киральность уже не является малой поправкой, и свойства киральной среды могут кардинально отличаться от свойств диэлектрика.

Материальные уравнения для киральных сред могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \varepsilon \vec{E} - i\chi \vec{H}, \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} + i\chi \vec{E}.\end{aligned}$$

Естественные киральные среды были известны с начала XIX века. Термин «киральный» введен Уильямом Томсоном и означает свойство объекта не совмещаться со своим зеркальным изображением в плоском зеркале ни при каких перемещениях и вращениях. Естественными киральными объектами являются молекулы сахаров, аминокислот, ДНК и оптических полимеров.

Киральные среды хорошо известны в оптике, где они называются **активными или гиротропными**. Обычно гиротропная среда анизотропна, хотя существуют важные исключения: гиротропной может быть изотропная среда, состоящая из киральных частиц, например, **водный раствор сахара**, в котором количество правых и левых частиц различно.

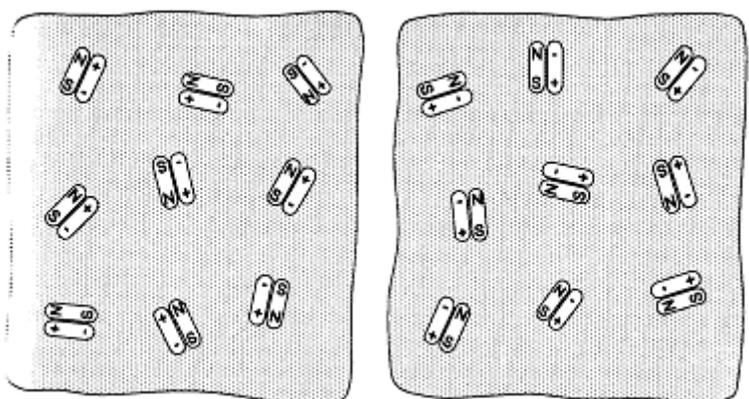
Весьма загадочным представляется тот факт, что наиболее важные ткани живых организмов гиротропны, а именно: образованы киральными молекулами, находящимися преимущественно в одной из двух зеркальных форм. В неживой природе количество правых и левых молекул в среднем обычно одинаково.

К числу искусственных киральных объектов можно отнести **спираль, лист Мёбиуса, неправильный тетраэдр** и т.д.

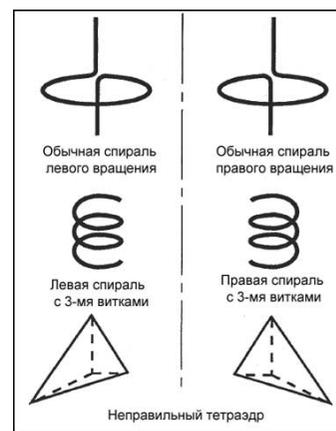
Нарушение киральной симметрии может быть вызвано внешним воздействием: механическим сжатием (**механическая гиротропия**), наложением магнитного и электрического полей (**магнитоактивные среды и электрогиротропия**), вращательным движением среды (**динамооптические эффекты**). Облучение среды светом (**нелинейная оптическая гиротропия**).

Получение киральных материалов

Идеальная модель Би-изотропных сред:



Типичные спирали:



Искусственные киральные материалы:



Модовый состав поля в киральном волноводе гораздо богаче, чем в волноводе с некиральным заполнением. Если в полом металлическом волноводе поле представимо в виде суперпозиции полей ТЕ- и ТМ – типов, то есть полей, для которых продольные компоненты электрического или магнитного полей равны нулю, то в киральных волноводах продольные компоненты могут обращаться в ноль только одновременно, что приводит к полному исчезновению поля. Поэтому все распространяющиеся в киральном волноводе моды являются смешанными.

Частоты отсечки, то есть частоты, при которых данная мода не может распространяться в волноводе, в киральном волноводе расположены ближе друг к другу, чем в некиральном волноводе. При этом наиболее низкая (основная) частота отсечки в киральном волноводе всегда отлична от нуля, то есть существует частотная область, в пределах которой волновод будет заперт для всех типов мод.

Важнейшим свойством киральных волноводов является явление бифуркации мод: дисперсионная кривая начинает раздваиваться («ветвиться»). Это означает, что для любой заданной частоты, большей частоты отсечки основной моды, существует пара мод, называемых бифуркированными, с различными постоянными распространения и одной и той же частотой отсечки. Таким образом, получаются два значения постоянных распространения для фиксированной частоты.