

CHIRAL
ELECTROMAGNETIC
OBJECTS AND MEDIA

V. V. SHEVCHENKO

A novel trend of investigations in the radiophysics and physical optics is represented. The chirality and its role in the description of electromagnetic particles and media are explained. The main scientific problems in this area are shown.

Представлено новое направление исследований в области радиофизики и физической оптики. Поясняются свойство киральности и его роль в описании электромагнитных частиц и сред. Указаны основные научные проблемы, которые в настоящее время решаются в этой области.

**КИРАЛЬНЫЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ОБЪЕКТЫ И СРЕДЫ**

В. В. ШЕВЧЕНКО

Российский университет дружбы народов, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Тематика статьи относится к таким разделам физики, как радиофизика и физическая оптика. В радиофизике к ней непосредственное отношение имеет подраздел прикладная электродинамика, имеющая выход в технику сверхвысоких частот (СВЧ) (в русской терминологии) или микроволновую технику (в английской). Физическая оптика и ее основная часть — волновая оптика в настоящее время эффективно развиваются в применении к таким разделам техники, как оптоэлектроника, включая лазерную оптику, волоконная и интегральная оптика. Прикладная электродинамика и волновая оптика являются также физической основой технологии искусственных электромагнитных материалов.

КИРАЛЬНОСТЬ

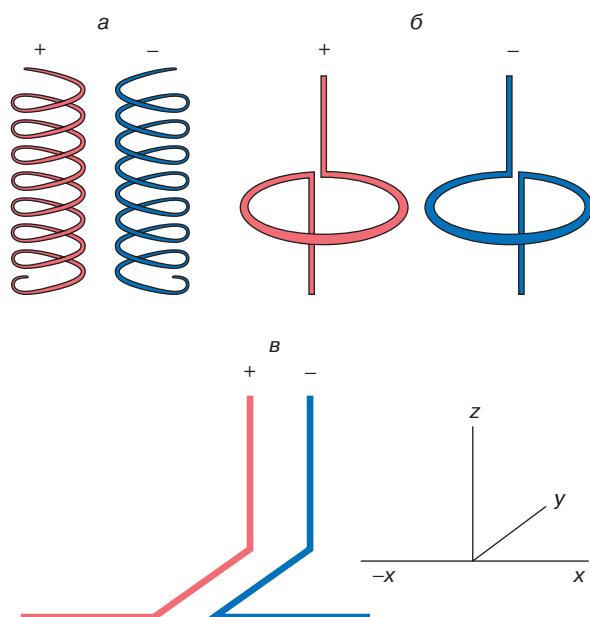
Корень слова *киральность* (chirality) греческого происхождения. Иногда это слово произносят как хиральность аналогично хиромантии и хирургии. *Кира* или *хира* по-гречески означает *рука*. Таким образом, термин *киральность* обозначает такое свойство объекта, каким обладает человеческая рука. Этот термин ввел в науку и дал ему определение известный английский ученый-физик Уильям Томсон (1824–1907), более известный как лорд Кельвин (температура по Кельвину, то есть по абсолютной шкале температур, предложенной Кельвінім). Он определил киральность как свойство объекта не совпадать, не совмещаться со своим зеркальным отображением (в плоском зеркале) ни при каких перемещениях и вращениях. Из этого определения следует, во-первых, что киральность — геометрическое свойство объекта, во-вторых, что этим свойством могут обладать только пространственные, то есть трехмерные, объекты. Плоские (двумерные) или линейные (одномерные) объекты в трехмерном пространстве этим свойством не обладают.

Киральные объекты могут существовать в двух видах: объект и его двойник, имеющий форму зеркального отображения, например руки, правая и левая, винты с правой и левой нарезками, спирали с правой и левой закрутками. Томсон исследовал киральные свойства кристаллов и молекул различных веществ и их двойников.

В электромагнитной теории важную роль играют металлические спирали (рис. 1, а), проводящие

электрический ток. Иногда даже используется термин *спиральная киральность*. Другими примерами киральных электромагнитных объектов могут служить проволочные элементы – фигуры, изогнутые так, как показано на рис. 1. Вторая пара (рис. 1, б) образована незамкнутыми кольцами с прямолинейными усиками, направленными перпендикулярно к плоскости кольца в разные стороны. Элементы отличаются направлениями загиба усиков в месте разрыва кольца. Если у первого элемента при движении вдоль проволоки снизу вверх при прохождении кольца совершается правое вращение, то у второго – левое. Прямолинейные части третьей пары (рис. 1, в) направлены вдоль осей соответственно правой и левой декартовых координатных систем.

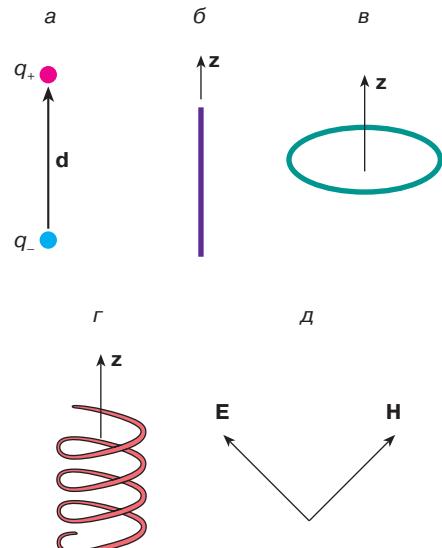
Среды из киральных молекул называются *киральными средами*. Искусственные электромагнитные среды образуются из киральных микроЭлементов, например маленьких, то есть много меньших длины электромагнитной волны спиралек. Такая среда может представлять собой либо упорядоченную структуру в виде пространственной решетки, либо хаотическую смесь киральных элементов с обычным диэлектриком. В химии два вещества из различных (правых и левых) видов киральных молекул называются *изомерами*.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Малые по сравнению с длиной волны объекты, обладающие электромагнитными свойствами, называют электромагнитными частицами. Простейшими электромагнитными частицами являются колеблющиеся электрический и магнитный диполи. Классический электрический диполь представляет собой два одинаковых по величине, но различных по знаку электрических заряда $+q$ и $-q$, разнесенных на некоторое расстояние d относительно друг друга (рис. 2, а). Свойства диполя описываются дипольным моментом $\mathbf{p}_e = q\mathbf{d}$, векторной величиной, где величина вектора \mathbf{d} равна расстоянию d , а направление соответствует направлению от отрицательного заряда к положительному. Если расстояние d изменяется во времени t , например $d = d_0 \cos \omega t$, где ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$, f – обычная частота в герцах, то есть в числе колебаний в секунду), то заряды движутся, возникает электрический ток. Величина дипольного момента меняется во времени: $\mathbf{p}_e = qd_0 \cos \omega t$, и в этом случае диполь излучает электромагнитную волну.

Малый по сравнению с длиной волны прямолинейный отрезок электрического проводника (рис. 2, б) представляет собой рассеивающий электрический диполь. Процесс рассеяния волны можно объяснить переизлучением электромагнитного поля. Если на проводник падает электромагнитная волна, то продольная компонента электрического поля E_z возбуждает в нем электрический ток, пропорциональный $E_z = E_{0z} \cos \omega t$. При этом электрический



дипольный момент, пропорциональный току, также пропорционален E_z :

$$\mathbf{p}_e = \alpha_e E_z \mathbf{z}, \quad (1)$$

где размерный коэффициент α_e называется поляризуемостью дипольной частицы, \mathbf{z} – единичный вектор, направленный вдоль проводника.

Рассеивающий магнитный диполь хорошо моделируется малым металлическим проволочным кольцом (рис. 2, *в*). Магнитный дипольный момент такого кольца создается кольцевым электрическим током, возбуждаемым магнитным полем, пронизывающим кольцо. При этом магнитный дипольный момент пропорционален ортогональной к плоскости кольца магнитной компоненте H_z падающей волны:

$$\mathbf{p}_m = \alpha_m H_z \mathbf{z}, \quad (2)$$

где α_m называется магнитной поляризуемостью, \mathbf{z} – единичный вектор, ортогональный к плоскости кольца. Структуры переизлучаемых электрическим и магнитным диполями электромагнитных полей показаны на рис. 3. Они симметричны с точностью до замены полей \mathbf{E} на \mathbf{H} и \mathbf{H} на $-\mathbf{E}$.

Если геометрия частицы не имеет выделенного направления, как, например, у металлического шарика, то вместо (1) и (2) можно написать

$$\mathbf{p}_e = \alpha_e \mathbf{E}, \quad \mathbf{p}_m = \alpha_m \mathbf{H}. \quad (3)$$

Отметим, что в рассмотренных случаях электрический диполь создается электрическим полем, а магнитный – магнитным полем. Это характерно для некиральных (зеркально симметричных) электромагнитных частиц. Иная ситуация имеет место для металлических спиралек. Рассмотрим, как образуются дипольные моменты при падении электромагнитной волны на малую проводящую спираль (рис. 2, *г*). Пусть поле в области спирали имеет компоненты E_z и H_z (рис. 2, *д*). Тогда продольная (вдоль оси спирали) составляющая электрического дипольного момента p_{ez} образуется как компонентой E_z электрического поля, создающего электрический ток вдоль оси спирали, так и компонентой H_z магнитного поля, пронизывающего кольца спирали и создающего кольцевой ток, имеющий продольную составляющую. Таким образом,

$$p_{ez} = \alpha_e E_z + \alpha_{em} H_z,$$

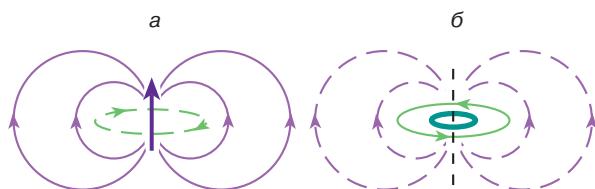


Рис. 3. Поля электрического (а) и магнитного (б) диполей

где α_{em} можно назвать электромагнитной поляризуемостью частицы. Аналогично продольная составляющая магнитного дипольного момента спирали p_{mz} образуется кольцевым электрическим током, создаваемым пронизывающим спираль магнитным полем, и к нему добавляется кольцевой ток, который создается электрическим полем, так как ток вдоль оси спирали может течь только проходя по кольцам спирали. В результате получается

$$p_{mz} = \alpha_m H_z + \alpha_{me} E_z,$$

где α_{me} – магнитоэлектрическая поляризуемость частицы. У спирали образуются еще другие (поперечные к оси спирали) составляющие электрического и магнитного дипольных моментов, которые также имеют киральный характер.

Приведенные рассуждения оказываются более понятными, если их применить ко второй паре элементов, показанных на рис. 2. С точки зрения дипольного представления такие элементы можно рассматривать как модели спиралек с эквивалентными p_{ez} , p_{mz} .

При комплексной записи зависимости электромагнитного поля от времени в виде $\exp(i\omega t)$ (напомним, что действительная часть $\exp(i\omega t)$ равна $\cos\omega t$) для спирали $\alpha_{em} = \mp i\beta$, $\alpha_{me} = \pm i\beta$, где верхний и нижний знаки соответствуют спиралям с правой и левой закрутками, β – вещественная положительная величина. С учетом этого продольную структуру дипольных моментов спирали можно записать в виде

$$p_{ez} = \alpha_e E_z \mp i\beta H_z, \quad p_{mz} = \pm i\beta E_z + \alpha_m H_z. \quad (4)$$

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СРЕДЫ

Электромагнитная модель среды состоит из дипольных электромагнитных частиц, естественная среда – из дипольных молекул; диэлектрическая среда – из электрических диполей, магнитная – из магнитных диполей. Магнитоэлектрическая среда образуется из частиц, обладающих и электрическим и магнитным дипольными моментами, например искусственная среда из металлических шариков. Киральная электромагнитная среда состоит соответственно из киральных дипольных частиц, естественная среда – из киральных дипольных молекул.

Как известно [1], дипольная электромагнитная структура обычных некиральных диэлектрических сред подтверждается так называемым явлением Брюстера, которое заключается в следующем. При некотором угле падения на плоскую границу среды плоской электромагнитной волны, электрический вектор которой лежит в плоскости падения, отраженная волна отсутствует. Этот эффект имеет место, когда угол между направлениями прошедшей и отраженной волн составляет 90° (рис. 4, *а*). Объясняется эффект процессом образования отраженной волны. Поле в среде формируется как падающей волной, так и суммарным полем, рассеянным (переизлученным) диполями молекул среды. Отраженная

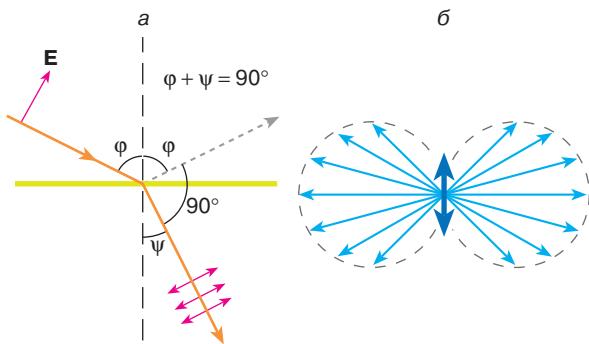


Рис. 4. Эффект Брюстера: а – отсутствие отраженной волны вдоль штриховой стрелки, б – диаграмма излучения дипольной частицы

волна образуется при интерференции только поля, переизлученного диполями. Поскольку диполи не излучают в направлении своей оси (рис. 4, б), то в этом направлении отраженная волна отсутствует.

Электромагнитное поле в среде описывается четырьмя векторными величинами: \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{D} , \mathbf{B} . Первые две – электрическая и магнитная напряженности поля, две другие – электрическая и магнитная индукции. Взаимосвязь электрического и магнитного полей со средой отражена в так называемых материальных уравнениях, которые используются как для естественных, так и для искусственных сред. Для некиральных сред они имеют вид

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (5)$$

где ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, описывающие электрические и магнитные свойства среды. В простейшем случае изотропных сред, то есть сред, не имеющих выделенных направлений в пространстве, ϵ и μ – скалярные величины. Процедура нахождения проницаемостей состоит в следующем. Среда реагирует на электромагнитное поле поляризацией частиц (образованием диполей). При этом, например, \mathbf{D} определяется как

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_e,$$

где ϵ_0 – размерная электрическая постоянная свободного пространства – вакуума (\mathbf{D} и \mathbf{E} имеют разные размерности), \mathbf{P}_e – вектор электрической поляризации среды, равный суммарному дипольному моменту частиц в единице объема. Если форма частиц не имеет выделенных направлений, как у металлических шариков, то направление дипольных моментов всех частиц одинаково и $\mathbf{P}_e = N \mathbf{p}_e$, где N – число частиц в единице объема. При этом, согласно (3), $\mathbf{p}_e = \alpha_e \mathbf{E}$, где \mathbf{E}' – поле в точке расположения диполя. Оно несколько отличается от среднего электрического поля в среде \mathbf{E} , но пропорционально ему. Поэтому можно написать $\alpha_e \mathbf{E}' = \alpha'_e \mathbf{E}$, где α'_e несколько отличается от α_e . Таким образом, $\mathbf{P}_e = N \alpha'_e \mathbf{E}$. Если же форма частиц имеет выделенное направление, как у металлических проволочек, но их направ-

ления случайны, можно считать, что в среднем только часть диполей $N' < N$ будет давать вклад в \mathbf{P}_e , поэтому $\mathbf{P}_e = N' \alpha'_e \mathbf{E}$. Важно, что в обоих случаях \mathbf{P}_e пропорционально \mathbf{E} , и можно записать $\mathbf{P}_e = \bar{\alpha}_e \mathbf{E}$, где, согласно сказанному, $\bar{\alpha}_e$ – поляризуемость среды в единице объема. В итоге получаем

$$\mathbf{D} = (\epsilon_0 + \bar{\alpha}_e) \mathbf{E}, \quad \epsilon = \epsilon_0 + \bar{\alpha}_e.$$

Аналогично, с некоторыми изменениями, не существенными для нашего упрощенного изложения, находится $\mu = \mu_0 + \bar{\alpha}_m$, где μ_0 – магнитная постоянная вакуума, $\bar{\alpha}_m$ – магнитная поляризуемость среды.

Повторяя приведенные рассуждения для среды с киральными частицами, такими, как металлические спиральки, в случае хаотической (случайной) ориентации частиц с учетом (4) получим

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \mp i\kappa \mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \pm i\kappa \mathbf{E} \quad (6)$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon & \mp i\kappa \\ \pm i\kappa & \mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\epsilon = \epsilon_0 + N' \alpha'_e$, $\mu = \mu_0 + N' \alpha'_m$, $\kappa = N' \beta'$ – киральный параметр. Если же киральные частицы (спиральки) расположены упорядоченно и их оси ориентированы в направлении оси z , то среда оказывается анизотропной [2–4], то есть для различных пространственных компонент поля значения ϵ , μ , κ будут различны. Для продольных компонент

$$D_z = \epsilon E_z \mp i\kappa H_z, \quad B_z = \mu H_z \pm i\kappa E_z,$$

где $\epsilon = \epsilon_0 + N \alpha'_e$, $\mu = \mu_0 + N \alpha'_m$, $\kappa = N \beta'$.

При практическом осуществлении искусственной киральной среды спиральки помещают в некоторую некиральную среду. Чтобы учесть ее свойства, необходимо заменить ϵ_0 , μ_0 на параметры среды ϵ_c , μ_c .

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИСПЕРСИЯ

При рассмотрении электромагнитной модели обычной (некиральной) среды предполагают, что она описывает свойства сплошной среды. Соответствующая наука называется электромагнитной теорией или электродинамикой сплошных сред. Киральные же свойства связаны с проявлением дискретной структуры среды. Киральный параметр κ пропорционален отношению a/λ , где a – линейный размер частицы – элемента среды, λ – длина волн. При $a/\lambda \rightarrow 0$ киральные свойства среды исчезают. Таким образом, учет киральных свойств означает учет влияния “крупинок” среды или пространственной дисперсии.

В оптике естественных сред значение отношения a/λ оказывается порядка 10^{-3} – 10^{-4} . Действительно, размер молекулы или атома составляет обычно несколько ангстрем, то есть порядка 10^{-10} м, а длина волны в оптическом диапазоне равна длине порядка одного микрона, то есть порядка 10^{-6} м.

У органических веществ, например полимеров, размеры молекул значительно больше, поэтому киральные свойства проявляются сильнее. К сожалению, полимеры слабо прозрачны для оптических волн.

В оптике с проявлением пространственной дисперсии и киральных свойств среды связано явление, которое называется оптической активностью среды. В средней школе на уроках физики этот эффект демонстрируется при прохождении света через водный раствор сахара. Направление поляризации линейно-поляризованной волны изменяется при прохождении через кювету с раствором. Эффект объясняется тем, что в растворе не могут распространяться линейно-поляризованные световые волны, а только волны с круговой поляризацией (см. следующий раздел). На выходе кюветы две такие волны, составляющие в сумме линейно-поляризованный свет, оказываются разделенными, так как распространяются с разными скоростями. После прохождений кюветы на выходе суммарная волна снова имеет линейную поляризацию, но ее направление оказывается повернутым.

Оптическая активность в естественных средах не нашла своего применения из-за малости эффекта, малости кирального параметра κ . Исключением можно считать лишь жидкие кристаллы. Иная ситуация может сложиться для искусственных электромагнитных сред, где величину $\kappa = Ca/\lambda$ можно значительно увеличить, увеличив отношение a/λ , а главное – увеличив коэффициент C путем использования резонансных свойств частиц среды, например резонанса тока вдоль спиральки. Линейные размеры спиральки могут быть малыми по сравнению с длиной волны, а длина проволоки, из которой сделана спиралька, может быть порядка длины волны, что обеспечивает условие резонанса. В этом случае киральность уже не является малой поправкой и свойства киральной среды могут кардинально отличаться от свойств некиральной среды не только за счет накопления малого эффекта, как в явлении оптической активности.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Из научных проблем, решаемых в области электродинамики и оптики киральных сред, можно выделить следующие две основные. Во-первых, это нахождение параметров киральной среды ϵ , μ , κ по геометрическим и физическим параметрам частиц – элементов среды, а также по параметрам ее пространственной микроструктуры. Во-вторых, в предположении, что материальные уравнения киральной среды известны, это решение задач излучения, распространения и дифракции волн в киральных средах, в направляющих (антенны) и волноведущих (волноводы, световоды) структурах при наличии киральных сред. Имеется в виду решение всех основных задач электродинамики и оптики, которые ре-

шались для некиральных сред, а также новых задач, специфических для сред с киральными свойствами.

И хотя интенсивное исследование киральных сред в прикладной электродинамике проводится уже около десятка лет, до сих пор не существует за конченной аналитической теории искусственной киральной среды с элементами в виде металлических спиралей. Имеется лишь полукачественный способ вычисления параметров такой среды. Количественные же характеристики находятся с помощью численных расчетов методами вычислительной физики, а также компьютерного эксперимента. Только таким образом удается пока получать приемлемое количественное соответствие вычисленных данных с результатами физического эксперимента.

При исследовании киральных электромагнитных объектов и сред можно выделить два вида проявления киральных свойств объектов: микрокиральность и макрокиральность. Удобно это пояснить на примерах. По-видимому, первой рассчитанной киральной искусственной средой была среда, содержащая сферические включения из кирального материала [5]. В этом случае в киральных шариках проявлялись микрокиральные свойства среды шариков. В отличие от этого в металлических спиральках как элементах искусственной среды проявляются макрокиральные структурные свойства спирали. Другой пример: в волноводе, заполненном киральной средой, проявляются микрокиральные свойства заполняющей среды, а в скрученном винтообразно волноводе – структурные киральные свойства волновода в целом. Объекты и среды с микрокиральными и макрокиральными свойствами исследуются различными методами [6–12].

При решении задач о распространении волн в киральных средах показано, что в среде, описываемой материальными уравнениями вида (7), то есть в изотропной киральной среде, плоские волны могут иметь только круговую поляризацию. Как известно [1–3], в некиральных средах плоские волны могут иметь линейную, круговую и в общем случае эллиптическую поляризацию. В обычных (некиральных) средах плоские волны с линейными ортогональными поляризациями и круговыми, правой и левой, поляризациями оказываются вырожденными, то есть имеют одну и ту же скорость распространения, поэтому любая их линейная комбинация может устойчиво распространяться. В киральных же средах циркулярные волны с правой и левой круговыми поляризациями распространяются с разными скоростями, их линейная комбинация не может быть устойчивой, следовательно, не могут быть устойчивыми волны с линейной и эллиптической поляризациями. Ситуация существенно усложняется при распространении волн в ограниченных структурах: волноводах, световодах, резонаторах [6–12]. Обобщение существующей теории на задачи распространения волн в структурах, заполненных или

образованных киральной средой, представляет собой одну из проблем современной прикладной электродинамики.

Существуют несколько групп, которые проводят теоретические и экспериментальные исследования в рассматриваемой области: в Финляндии, в Хельсинкском технологическом университете, в США, в Пенсильванском университете, в Белоруссии, в Гомельском университете, в России, в Петербурге, в Техническом университете, и в Москве, в Научном центре прикладных проблем электродинамики и Институте радиотехники и электроники Российской Академии наук, научные группы в Англии, Франции, Германии и Южно-Африканской Республике. В целом они составляют так называемый незримый, то есть неформальный, коллектив, который начиная с 1993 года регулярно собирается на научные конференции. Инициативу проведения конференций проявили финские ученые, проведя первую конференцию в Хельсинки. Затем прошли конференции в Гомеле, Перигё (Франция), в Пенсильванском университете, г. Стейт-Колледж (США). В 1996 году очередная конференция под названием "Chiral-96" состоялась в Петербурге с перездом в Москву. Таким образом, развитие этого нового научного направления – электродинамики и оптики киральных объектов и сред проводится активно и результативно. Полученные научные результаты составят основу новых технических и технологических применений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время развиваются два основных направления исследований в области электромагнитной киральности: исследования киральных свойств объектов как элементов искусственных структурных сред и рассмотрение и решение задач о поведении электромагнитных полей и волн в киральных и более общих (би-изотропных, би-анизотропных) средах в предположении, что материальные соотношения (уравнения) для них известны. Основные положения и теоремы электродинамики киральных сред, включая уравнения поля, то есть уравнения Максвелла, принцип Гюйгенса, теорему взаимности и т.д., сформулированы как обобщение известных положений теории некиральных сред. Однако их применение в конкретных задачах при исследовании физических объектов и технических устройств еще предстоит осуществить.

Можно отметить еще третье, технологическое направление исследований, связанное с разработ-

кой и созданием киральных объектов и сред с заданными электромагнитными свойствами. В процессе развития первых двух направлений определяются основные физические свойства киральных объектов и сред, а третьего – конкретные их применения в технике и быту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
3. Туров Е.А. Материалные уравнения электродинамики. М.: Наука, 1983.
4. Федоров Ф.И. Теория гиротропии. Минск: Наука и техника, 1976.
5. Борен К.Ф., Хафмен Д.Р. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
6. Lindell I.V., Sihvola A.H., Tretyakov S.A., Viitanen A.J. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media. L.: Artech House, 1994.
7. Третьяков С.А. Электродинамика сложных сред: Киральные, би-изотропные и некоторые би-анизотропные материалы // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 10. С. 1457–1470.
8. Vinogradov A.P. Microscopic Properties of a Chiral Object // Proc. Bi-Anisotropics-93. 1993. Р. 22–26.
9. Шевченко В.В. Моды в киральных волоконных световодах // Радиотехника. 1994. № 2. С. 80–84.
10. Шевченко В.В. Дифракция на малой киральной частице // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40, № 12. С. 1777–1789.
11. Каценеленбаум Б.З., Колесниченко Ю.В., Францессон А.В., Шевченко В.В. Скрученные диэлектрические волноводы: Макро- и микрокиральность, полоса непрозрачности // Там же. 1996. Т. 41, № 5. С. 531–538.
12. Kostin M.V., Shevchenko V.V. On Electromagnetic Theory of Artificial Nonchiral and Chiral Media with Resonant Particles // Advances in Complex Electromagnetic Materials / Eds. A. Priou et al. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997. P. 261–270.

* * *

Виктор Васильевич Шевченко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Российского университета дружбы народов, главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники РАН. Область научных интересов: радиофизика и оптика – прикладная электродинамика, квазиоптика, волоконная и интегральная оптика. Автор и соавтор около 150 научных работ, в том числе двух монографий, шести изобретений.