

Взаимодействие электромагнитных волн с искусственными киральными объектами – новая область электродинамики

И. В. СЕМЧЕНКО, С. А. ХАХОМОВ

Корень слова киральность (chirality) – греческого происхождения. Иногда это слово произносят как хиральность аналогично хиромантии и хирургии. Этот термин соответствует английскому *chiral* и происходит от греческого слова *χερ* (кира или хира), что значит "рука". Таким образом, термин киральность обозначает такое несимметричное 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 Кельвиным). 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 (рис. 1). Томсон исследовал киральные свойства кристаллов и молекул различных веществ и их двойников.

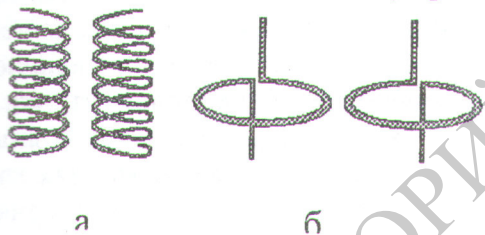


Рис. 1 – Типы спиральных элементов:

- а) спиральный элемент с правой и левой намоткой;
- б) каноническая спираль с правой и левой намоткой.

Концепция киральности играет большую роль в биологии¹, химии, физике элементарных частиц и в оптике.

¹ Среди вопросов, которые интересуют науку, философию, религию, каждого человека, важнейшим является: что такое жизнь? Как она появилась на Земле? Луи Пастер в XIX в. первым обратил внимание на то, что в неживой природе молекулы либо зеркально симметричны (H_2O , CO_2), либо одинаково часто встречаются их правые и левые стереоизомеры. Молекулы, из которых построены живые организмы, зеркально асимметричны, то есть киральны, чаще всего они подобны винтам, а во многих случаях ими и являются (например, двойная спираль молекулы ДНК). Но самое главное, эти молекулы встречаются в природе лишь в каком-то одном варианте: либо только левом, либо только правом это так называемые кирально чистые молекулы (так, спираль молекулы ДНК всегда только правая). Пастер, а затем Вернадский полагают, что именно здесь проходит граница между химией живой и неживой природы. Можно сказать, что в отличие от неорганических объектов живые организмы построены из винтов, причем винты одного типа только левые, другого – только правые. Специфика живых организмов – киральная чистота молекул. Человек как живой организм построен из молекул определенной киральности (для одних видов молекул левый, для других – правый). Потребляемая человеком органическая пища также построена из молекул определенной киральности. Ясно, что киральность молекул пищи согласуется с киральностью молекул человеческого организма (подобно тому, как правые гайки соответствуют с правыми винтами, а левые – с левыми). А что будет, если киральность молекул пищи вдруг изменится? Такая пища будет уже непригодной (как непригодны левые гайки для правых болтов), она может оказаться биологически ядовитой. Современная химия в ряде случаев искусственно получает зеркально отраженные стереоизомеры; их действие на организм человека оказывается совершенно иным по сравнению с действием природных стереоизомеров. Так "отраженный" стереоизомер витамина С не воспринимается организмом; добавки в пищу некоторых искусственно полученных "отраженных" стереоизомеров, например фенилаланина, приводят к резкому нарушению обмена веществ, сопровождающемуся умопомешательством, левомицетин является активным антибиотиком, в то время как его правовращающий изомер полностью лишен этого свойства. Именно с вопросами зеркальной симметрии-асимметрии на молекулярном уровне тесно связана проблема возникновения жизни на Земле – ведь живая материя возникла в свое время из неживой! Это возникновение обусловлено нарушением существовавшей до того зеркальной симметрии, образованием кирально чистых молекул. Современная наука пришла к выводу, что переход от мира зеркально симметричных соединений к кирально чистому состоянию живого вещества биосферы произошел не в процессе длительной эволюции, а скачком – в виде своеобразного Большого биологического взрыва. Происхождение этого состояния связано с катастрофой, то есть с достижением развивающейся средой критической точки (точки бифуркации), за которой теряется устойчивость прежнего симметричного состояния.

В 1811 г. Араго обнаружил, что при прохождении линейно поляризованного света через пластинку кварца в направлении его оптической оси плоскость поляризации света испытывает поворот на некоторый угол, величина которого пропорциональна толщине пластинки. Несколько позже Био обнаружил аналогичный эффект в жидкостях и газах. Это явление получило название оптической активности, или более точно – оптической вращательной способности среды [1]. В русскоязычной научной литературе используется также термин «гиротропия» (опять от греческого слова $\gamma\upsilon\rho\omicron\varsigma$, что значит «круг»), однако в англоязычной научной литературе этот термин не получил широкого распространения. Гиротропию можно рассматривать как один из видов анизотропии среды.

Свойством оптической активности могут обладать кристаллы, жидкости (в особенности растворы) и даже газы. При этом в одних случаях оптически активное кристаллическое вещество теряет свойство активности в растворенном (расплавленном, парообразном) состоянии, а в других случаях сохраняет его.

В веществах первого типа оптическая активность обусловлена характером расположения молекул в решетке кристалла. В веществах второго типа она, кроме того, должна быть связана с внутренней структурой самих молекул. Таким образом, свойство оптической активности может проявляться как на молекулярном уровне, так и на уровне макроскопического кристалла. Характерно, что вещества обоих типов встречаются в природе в двух модификациях, первая из которых правовращающая, а вторая – левовращающая. При этом обе модификации имеют тождественные химический состав и другие физико-химические свойства. Разновидности молекул, различающиеся лишь тем, что одни вращают плоскость поляризации вправо, а другие влево, называются оптическими изомерами. В свою очередь, разновидности одного и того же кристалла, вращающие плоскость поляризации в противоположные стороны, являются энантиоморфными друг к другу (от греческого $\epsilon\nu\alpha\nu\tau\iota\omicron\varsigma$ – «противоположный» и $\mu\omicron\rho\phi\eta$ – «форма»).

В основном оптической активностью обладают вещества, состоящие из киральных молекул. В 1848 г. Пастер предположил, что оптическая активность объясняется тем, что составляющие активное вещество молекулы являются киральными объектами. В последующем эта гипотеза была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена. Френель показал, что такое поведение световой волны может быть объяснено, если предположить, что в среде имеет место круговое двойное преломление света. На входе в среду две такие волны, составляющие в сумме линейно-поляризованный свет, оказываются разделенными, так как распространяются с разными скоростями. После прохождений среды на выходе суммарная волна снова имеет линейную поляризацию, но вектор поляризации оказывается повернутым.

С чисто физической точки зрения явление оптической активности представляет особый интерес в первую очередь потому, что именно в нем проявляются некоторые специфические глубокие и тонкие закономерности электродинамики материальных сред. Таким образом, свойство оптической активности непосредственно связано со структурой и формой молекул. Но структура молекулы может проявиться во взаимодействии с электромагнитной волной лишь в том случае, если размерами молекулы нельзя пренебречь при сравнении с длиной волны. Иными словами, расположенные в разных местах заряды, входящие в состав молекулы, должны по-разному реагировать на поле с длиной волны λ . Это различие обусловлено разностью фаз волны в разных точках молекулы и характеризуется отношением a/λ , где a — поперечный размер молекулы. Это отношение для видимого света имеет порядок $\sim 10^{-3}$, но, несмотря на малость этой величины, именно с ней связана сущность рассматриваемого явления [2, 3].

Взаимодействие света с естественными киральными средами хорошо изучено. Что же касается взаимодействия с искусственными киральными объектами электромагнитных волн сантиметрового и миллиметрового диапазона, где необходима векторная теория, то эти проблемы начали привлекать внимание исследователей относительно недавно. Это связано с появлением новых технологий, позволяющих получать соответствующие материалы, пригодные для использования в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн [4] и возможными применениями в технике СВЧ [5].

С точки зрения электромагнитной теории, оптическая активность является проявлением пространственной дисперсии в веществе. 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 [6]

$$\vec{D} = \vec{\varepsilon} \cdot \vec{E}, \quad \vec{B} = \vec{\mu} \cdot \vec{H},$$

где $\vec{\varepsilon}$ и $\vec{\mu}$ – 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.

Для гармонических волн материальные уравнения для киральных могут быть представлены в виде

$$\vec{D} = \vec{\varepsilon} \cdot \vec{E} + i\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \vec{\kappa} \cdot \vec{H}, \quad \vec{B} = \vec{\mu} \cdot \vec{H} - i\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \vec{\kappa}^T \cdot \vec{E},$$

Эти уравнения были предложены для би-изотропных сред в [7–9] и для природных кристаллов в [1, 10]. Здесь $\vec{D}, \vec{B}, \vec{E}$ и $\vec{H}$ – векторы индукции и напряженности электрического и магнитного полей, $\vec{\varepsilon}, \vec{\mu}$ и $\vec{\kappa}$ – тензоры диэлектрической, магнитной проницаемости и нормализованного параметра киральности соответственно, индекс T означает транспонирование.

Киральный параметр κ пропорционален отношению a/λ , где a – линейный размер частицы – элемента среды, λ – длина волны. При $a/\lambda \rightarrow 0$ киральные свойства среды исчезают. Таким образом, учет киральных свойств означает учет 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.

Оптическая активность в естественных средах не нашла своего широкого 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 κ можно значительно увеличить, увеличив отношение a/λ , а главное – путем использования резонансных свойств частиц среды, например резонансного возрастания тока вдоль спирали. Линейные размеры спирали могут быть малыми по сравнению с длиной волны, а длина проволоки, из которой сделана спираль, 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 [11].

Возникла идея о том, что киральными свойствами обладают не только молекулы в оптическом диапазоне электромагнитных волн, но и макроскопические тела со сходной структурой в микроволновом диапазоне.

Искусственные композитные среды, обладающие киральными свойствами в микроволновом диапазоне, активно исследовались в течение последних пятнадцати лет [12–22]. Основным мотивом исследований было предположение, что на основе искусственных киральных материалов могут быть созданы безотражательные покрытия металлических поверхностей. Было показано, что коэффициент отражения от кирального полупространства выражается (при нормальном падении плоской волны) такой же формулой, как и для обычного изотропного полупространства [23, 24]:

$$R = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1},$$

где теперь, однако, волновой импеданс киральной среды η_2 есть функция трех параметров: ϵ , μ и κ . Здесь η_1 – волновой импеданс соседней некиральной среды. Подбирая параметр киральности κ , можно получить $\eta_2 = \eta_1$ и $R=0$.

Исследования возможного использования искусственных киральных материалов для уменьшения отражения электромагнитных волн проводились во многих статьях [15-18]. Однако в работе [20] сделан вывод о том, что киральность не является существенным свойством при создании безотражательных покрытий. Достичь существенного снижения интенсивности отраженных электромагнитных волн на определенной частоте можно также с помощью некиральных поглощающих слоев. Авторы работы [20] пришли к такому выводу в результате расчета рассеяния электромагнитных волн на металлических спиралях в диэлектрической среде. Такую среду можно создать искусственно, поместив металлические проводочные включения спиральной или Ω -образной формы в диэлектрический материал [22]. Могут быть созданы изотропные среды, когда свойства диэлектрика не зависят от выбранного направления, и ориентация элементов в пространстве является хаотической. Возможен также случай, когда все спиральные или Ω -образные элементы упорядочены в пространстве и моделируемая среда приобретает анизотропные свойства.

Может быть создана также периодическая слоистая среда, сформированная из слоев полимеров, содержащих металлические спиральные или Ω -включения (рис.2). Чередующиеся слои могут обладать различными диэлектрическими, магнитными, киральными свойствами, что позволяет моделировать и предсказывать поведение новых сложных композиционных материалов и исследовать электромагнитные свойства таких сред. Наличие анизотропии в таких средах может создать дополнительные возможности для преобразования характеристик электромагнитных волн и, следовательно, управления этими волнами.

Несмотря на возрастающий интерес к изучению и использованию искусственных сред, обладающих киральными свойствами в микроволновом диапазоне, многие задачи, связанные с распространением и взаимодействием электромагнитных волн в таких структурах, остаются нерешенными.

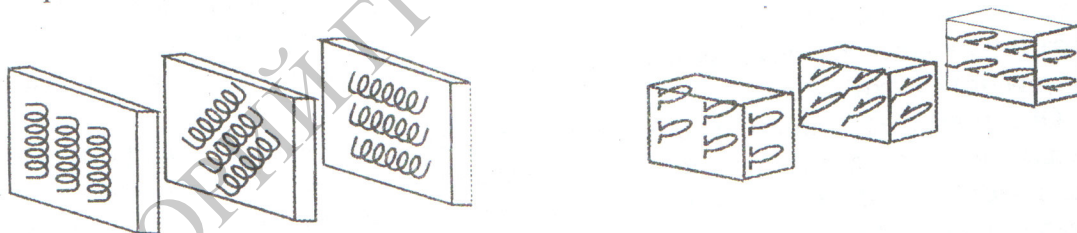


Рис.2 Модель макроскопической спирали, состоящей из слоев, содержащих упорядоченные микроспираль или Ω -образные элементы.

Теорией оптической активности занимались многие ученые такого ранга, что их можно с полным основанием отнести к классикам науки: Френель, Био, Эйри, Коши, МакКуллаг, Пастер, Брио, Буссинек, Поклингтон, П. Кюри, Гиббс, Гольдгаммер, Друде, Фойгт, Борн, Озеен, Дж. Томсон, Кирквуд, Кондон, Коттон, Джонс и др.[1] Значительный вклад в развитие теории оптической активности внесли белорусские ученые Федор Иванович Федоров [1], Борис Васильевич Бокуть [2,10], Анатолий Николаевич Сердюков [2,10].

В настоящее время существуют несколько групп, которые проводят теоретические и экспериментальные исследования в рассматриваемой области: в Финляндии – в Хельсинкском технологическом университете (А.Сихвола, С.Третьяков), в США – в Пенсильванском университете (А. Лахтакия), в Белоруссии – в Гомельском университете (И.В.Семченко, С.А.Хахомов), в России – в Петербурге, в Техническом университете (А.Сочава), в Москве в Научном центре прикладных проблем электродинамики (А.Виноградов) и Институте радиотехники и электроники Российской Академии наук (В. Шевченко), а также научные группы в Англии (Л. Арно), Франции (С. Болиоли), Германии (А.Якоб, технический университет

г. Брауншвейга), Украине (Л. Любчанский, Донецкий физико-технический институт НАН Украины, С. Просвирнин, радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков) и Южно-Африканской Республике (С. Куэл, университет г. Стелленбош). В целом они составляют незримый, то есть неформальный, коллектив, который, начиная с 1993 года, регулярно собирается на научные конференции.

Инициативу проведения конференций проявили финские и белорусские ученые, проведя первую конференцию в 1993 году в Хельсинки [25]. Затем в том же году прошла конференция в Гомельском государственном университете им. Ф. Скорины, почетным председателем которой был Ф. И. Федоров [26].

Затем состоялись конференции в Перигё (Франция) в 1994 году [27], в Пенсильванском университете, г. Стейт-Колледж (США) в 1995 году [28]. В 1996 году очередная конференция состоялась в Петербурге с переездом в Москву [29]. Последующие конференции проходили в Глазго (Великобритания) в 1997 году [30], в Брауншвейге (Германия) в 1998 году [31], в Лиссабоне (Португалия) в 2000 году [32], в Марракеше (Марокко) в 2002 году [33] и в Генте (Бельгия) в 2004 году [34].

Кроме того, на многих международных конференциях по радиофизике и оптике в последние годы свойства искусственных киральных сред обсуждаются на специальных секционных заседаниях. В 2001 году в ГГУ им. Ф. Скорины состоялась международная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», приуроченная к 75-летию академика Б. В. Бокутя, на которой финские, российские, белорусские, украинские, португальские ученые представляли результаты своих исследований в области электродинамики киральных сред. За последние годы изданы также несколько монографий финских, российских и американских ученых. В частности, в 2001 году в известном международном научном издательстве «Гордон и Брич» на английском языке опубликована монография А. Н. Сердюкова, И. В. Семченко, С. А. Третьякова, А. Х. Сихволы «Электродинамика бианизотропных материалов: теория и приложения» [35].

Таким образом, развитие этого нового научного направления – электродинамики и оптики киральных объектов и сред проводится активно и результативно.

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 и 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 волноводных (волноводы, световоды) структурах при наличии киральных сред. Имеется в виду решение всех основных задач электродинамики и оптики, которые решались 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 законченной аналитической теории искусственной киральной среды с элементами в виде металлических спиралей. Имеется лишь приближенный, качественный способ вычисления параметров такой среды. Количественные же характеристики находятся с помощью численных расчетов методами вычислительной физики, а также компьютерного эксперимента. Только таким образом удастся пока получать приемлемое количественное соответствие вычисленных данных с результатами физического эксперимента [11].

В Гомельском государственном университете на физическом факультете авторами на протяжении более 10 лет ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области электродинамики сред с периодическими анизотропными и киральными свойствами. В результате исследований было обнаружено, что благодаря другим свойствам киральные материалы могут найти не меньше потенциальных приложений, чем киральные поглотители.

Рассматривая только киральные среды, можно сказать, что наиболее полезным в практическом отношении свойством является преобразование поляризации волн, прошедших

через киральный образец. В сравнении с оптикой новый аспект заключается в том, что киральные среды могут быть сконструированы и созданы на основе металлических спиральных или Ω -образных элементов и проявлять свои свойства в микроволновом диапазоне.

Авторами разработана аналитическая модель, позволяющая рассчитать электрический дипольный момент и магнитный момент, возникающие в спирали под действием падающей электромагнитной волны.

Проведено сравнение предлагаемой модели с ранее известной моделью канонической спирали, в которой металлическая спираль приближенно рассматривается как комбинация прямолинейного проводника и плоского кругового витка. Новая модель позволяет учесть все геометрические параметры спирали, в том числе угол намотки витков.

Найдены оптимальные параметры спирали, при которых наблюдается наиболее эффективное преобразование поляризации электромагнитных волн, в частности, поворот плоскости поляризации на максимальный угол. Изготовлены образцы комплексных материалов на основе диэлектрика с упорядоченно расположенными спиральными элементами, имеющими оптимальные параметры.

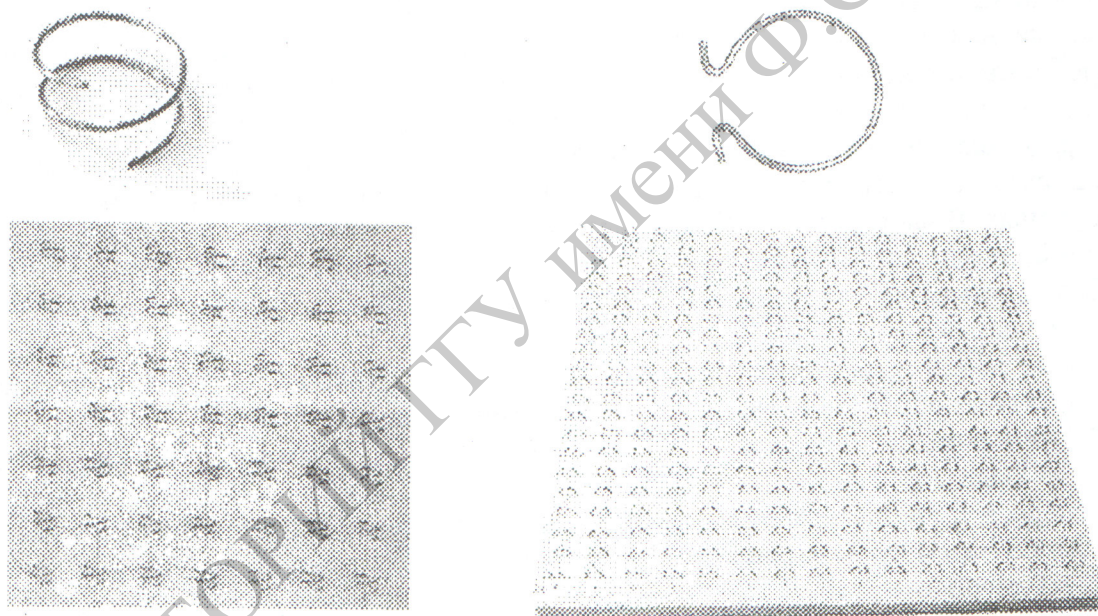


Рис.3 Двумерные решетки, состоящие из двухвитковых спиральных излучателей и Ω -образных элементов, закрепленных на пластине из радиопрозрачного материала. Образцы изготовлены с учетом предварительно рассчитанных оптимальных параметров в Гомельском государственном университете им. Ф.Скорины.

Разработан оригинальный метод закрепления спиралей на пластине из радиопрозрачного материала, обладающий рядом преимуществ: отсутствие приклеивания спиралей, возможность поворота концов спиралей относительно приемника и излучателя, возможность изменения периодов двумерной решетки.

Проведено сравнение расчетов с экспериментом и достигнуто эффективное преобразование поляризации электромагнитных волн в слое искусственной композитной среды на основе диэлектрика с упорядоченно расположенными металлическими спиральными элементами.

Экспериментальные исследования проводятся в безэховой камере, которая представляет собой помещение, облицованное изнутри радиопоглощающим материалом с целью уменьшения отражения от стен и обеспечения в некотором объеме камеры – безэховой зоне – заданного малого уровня отражений, то есть условий, приближающихся к условиям «свободного пространства». Широкому применению безэховых камер способствует их экранирование, обеспечивающее помехозащищенность. В то же время радиоизмерения в экраниро-

ванных камерах полностью свободны от различных естественных и искусственных радио- и электропомех, что позволяет выполнять точные измерения [36].

Полученные результаты были доложены на международных конференциях в Финляндии (1993 г.), в Гомеле (1993 г.), во Франции (1994 г.), в США (1995 г.), в С-Петербурге-Москве (1996 г.), в Глазго (Великобритания) (1997 г.), в Брауншвейге (Германия) (1998 г.), в Торонто (Канада) (1999 г.), в Турку (Финляндия) (1999 г.), в Лиссабоне (Португалия) (2000 г.), в Мозыре (Беларусь) (2000), в Гомеле (Беларусь) (2001 г.), в Марракеше (Марокко) (2002 г.), в Минске (Беларусь) (2002 г.), в Генте (Бельгия) (2004 г.) и опубликованы в сборниках конференций [25–34, 37–40], в ведущих научных журналах [19, 41–45], а также в главах двух коллективных монографий, изданных в 1997 и 2003 годах в престижном международном научном издательстве Kluwer Academic Publishers (Нидерланды) [46, 47].

Abstract. The authors developed an analytical model which permits to calculate the electric dipole moment and the magnetic moment, arising in a spiral under the action of a falling electromagnetic wave, found out optimum parameters of the spiral, made samples of the complex materials.

Литература

1. Ф. И. Федоров, *Теория гиротропии*, Мн.: Наука и техника, 1976.
2. Б. В. Бокуть, А. Н. Сердюков, *Основы теоретической кристаллооптики*, Гомель: Репринт ГТУ, 1-4, 1977.
3. Г. С. Ландсберг, *Оптика*. М.: Наука, 1978.
4. V. V. Varadan, A. Lakhtakia, V. K. Varadan, J. Appl. Phys., **2**, 63 (1988).
5. W. Weiglhofer, Proc. 1989 URSI Int. Symp. On Electromagn. Theory, Stockholm, 271.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, М.: 1982.
7. A. H. Sihvola, I. V. Lindell, *Bi-isotropic constitutive relations*, Microwave and Opt. Tech. Lett., **4**, No. 8 (1991), 195–297.
8. J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, Willey, New York, 1986.
9. J. C. Monzon, *Radiation and scattering in homogeneous general bi-isotropic region*, IEEE Trans. Ant. Propagat., **38**, No. 2 (1990), 227–235.
10. Б. В. Бокуть, А. Н. Сердюков, *К феноменологической теории естественной оптической активности*, ЖЭТФ, **61**, № 5 (1971), 1808–1813.
11. В. В. Шевченко, *Киральные электромагнитные объекты*. Соровский образовательный журнал, №2 (1998), 109–114.
12. A. Priou, A. Sihvola, S. Tretyakov and A. Vinogradov, *Advances in Complex Electromagnetic Materials*, Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series 3, **28** (1997).
13. J. H. Cloete, *The status of experimental research on chiral composites*, Proc. of Bianisotropics'97, (University of Glasgow), 1997, 39–42.
14. X. Lafosse, *New all-organic chiral material and characterisation between 4 and 6 GHz*, 3rd Int. Workshop on Chiral, Bi-isotropic and Bi-anisotropic Media "Chiral-94", (Perigueux, France), 1994, 209–214.
15. K. W. Whites, C. Y. Chang, *Composite uniaxial bianisotropic chiral materials characterization: comparison of predicted and measured scattering*, J. Electromagn. Waves Applic., **11** (1997), 371–394.
16. S. A. Tretyakov, A. A. Sochava, C. R. Simovski, *Influence of chiral shapes of individual inclusions on the absorption in chiral composite coatings*, Electromagnetics, **16** (1996), 113–127.
17. J. H. Cloete, M. Bingle and D. B. Davidson, *The role of chirality in synthetic microwave absorbers*, Proc. Int. Conf. Electromagnetics in Advanced Applications, (Torino, Italy) (1999), 55–58.
18. S. A. Tretyakov, A. A. Sochava, *Proposed composite material for nonreflecting shields and antenna radomes*, Electron. Lett., **29** (1993), 1048–1049.
19. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, E. A. Fedosenko, *Reflection and transmission by a uniaxially bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves*, Journal of Physics D: Applied Physics, No. 31 (1998), 2458–2464.

20. C. F. Bohren, R. Luebers, H. S. Langdon, F. Hunsberger, *Microwave-absorbing chiral composites: Is chirality essential or accidental?* Applied Optics, **31**, No. 30 (1992), 6403–6407.
21. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, E. A. Fedosenko, *Artificial anisotropic chiral materials for decrease of reflection of electromagnetic waves from metallic surfaces International Scientific conference "Optics of Crystals"*, Mozyr, Belarus, 26–30 September 2000, 65–66.
22. S. A. Kuehl, S. S. Grove, E. Kuehl, M. Bingle, J. H. Cloete, *Manufacture of microwave chiral materials and their electromagnetic properties*, in *Advances in Complex Electromagnetic Materials*, ed. by A. Priou et al., Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series 3, **28** (1997), 317–332.
23. S. Bassiri, C. H. Papas, N. Engheta, J. Opt. Soc. Amer., A5, **1450** (1988).
24. С. А. Третьяков, *Волны и дифракция-90*, М.: Физическое общество СССР, **3** (1990), 197–199.
25. A. Sihvola (ed.), *Proceedings of Bi-isotropics'93, Workshop on novel microwave materials*, 1–4 February 1993, Helsinki, Finland.
26. A. Sihvola, S. Tretyakov, and I. Semchenko (eds.), *Proceedings of Bianisotropics'93, Seminar on electrodynamics of chiral and bianisotropic media*, 12–14 October 1993, Gomel, Belarus.
27. F. Mariotte and J. P. Parneix (eds.), *Proceedings of the 3rd Int. Workshop on Chiral, Bi-isotropic and Bi-anisotropic Media "Chiral-94"*, May 18–20, 1994, Perigueux, France.
28. A. Sihvola, S. Tretyakov, U. Unrau, Vas. Varadan, Vi. Varadan and K. Whites (eds.), *Proceedings of Chiral'95*, October 12–14, 1995, The Pennsylvania State University, USA.
29. A. Sihvola, S. Tretyakov, A. Vinogradov and A. Priou, *Proceedings of Chiral' 96*, 23–30 July 1996, St. Petersburg–Moscow, Russia.
30. W. H. Weiglhofer (ed.), *Proceedings of Bianisotropics'97*, June 5–7 1997, University of Glasgow, Great Britain.
31. A. F. Jacob and J. Reinert (eds.), *Proceedings of Bianisotropics'98*, June 3–6 1998, Technische Universitat Braunschweig, Germany.
32. A. M. Barbosa and A. L. Topa (eds.), *Proceedings of Bianisotropics'2000*, 8th International Conference on Complex Media, 27–29 September 2000, Lisbon, Portugal.
33. S. Zouhdi, A. Sihvola, M. Arsalane, *Proceedings of Bianisotropics'2002*, 9th International Conference on Complex Media, 8–11 May 2002, Marrakech, Morocco.
34. F. Olyslager, A. Franchois, A. Sihvola, *Proceedings of Bianasotropics' 2004*, 10th International Conference on Complex Media and Metamaterials, 22–24 September 2004, Het Pand, Chent, Belgium.
35. A. N. Serdyukov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola *Electromagnetics of bi-anisotropic materials: Theory and Applications*. Gordon and Breach Publishing Group, London 2001.
36. М. Ю. Мицмахер, В. А. Торгованов, *Безэховые камеры СВЧ*, М.: Радио и связь, 1982.
37. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, A. F. Jacob, *Artificial uniaxial chiral media at an oblique incidence of electromagnetic waves*, XXVIth General Assembly of Radio Science, session BP2, August 13–21, 1999, Toronto, Canada. P. 202
38. S. A. Khakhomov, I. V. Semchenko, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, *Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality*, XXVIth General Assembly of Radio Science, session BP2, August 13–21, 1999, Toronto, Canada, p. 185
39. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, *Influence of local chirality on the Bragg reflection in the multilayer media with spiral structure*, URSI/IEEE XXIV National Convention on Radio Sciences, Turku, Finland, 4–5 October 1999.
40. И. В. Семченко, С. А. Хахомов, В. И. Кондратенко, А. Л. Самофалов, *Исследование поляризации электромагнитного излучения, рассеянного на металлической спираль*, Лазерная и оптико-электронная техника, сборник научных статей, выпуск 7, Минск 2002 г., 84–91.
41. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, *Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality under normal incidence of waves*, J. Phys. D: Appl. Phys., **32** (1999).
42. S. A. Tretyakov, S. A. Khakhomov, A. H. Sihvola, I. V. Semchenko, *Reply to comment on "Reflection and transmission by a uniaxially bi-anisotropic slab under normal incidence of plane waves"*, J. Phys. D: Appl. Phys., **32** (1999).

43. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, E. A. Fedosenko, *Artificial anisotropic chiral materials for decrease of reflection of electromagnetic waves from metallic surfaces*, In "Optics of Crystals", V. V. Sepelevich, N. N. Egorov (editors), Proceedings of SPIE, **4358** (2001), 309–315.

44. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, S. A. Tretyakov, A. H. Sihvola, *Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties*, Electromagnetics, **21**, No. 5 (2001), 401–414,

45. I. V. Semchenko, S. A. Khakhomov, *Artificial uniaxial bi-anisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves*. Electromagnetics, **22**, No. 1 (2002), 71–84.

46. A. Priou, A. Sihvola, S. Tretyakov, and A. Vinogradov, *Advances in Complex Electromagnetic Material*, Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series 3, **28** (1997).

47. S. Zouhdi, A. Sihvola, M. Arsalane, *Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials*,. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, NATO Science Series II, Vol. 89.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 08.12.04