Известия Гомельского государственного университета
имени Ф. Скорины, № 6 (93), 2015

УДК 621.396

Волноводная теория гирации

В.И. Кондратенко

В настоящее время существенное развитие получило направление, связанное с переносом результатов моделирования распространения электромагнитных волн СВЧ-диапазона в оптический диапазон и наоборот. Подобный процесс, с одной стороны, позволяет уяснить механизм взаимодействия света со средами, обладающими определенными особенностями структуры, путем перехода от феноменологических моделей к микроскопическим, а с другой стороны – позволяет определить подходы к созданию метасред, обладающих вполне определенными свойствами, отличными от свойств реальных природных структур. В настоящей работе проведено теоретическое рассмотрение возможности создания искусственных гиротропных сред с заданными параметрами на основе металлических и металло-диэлектрических структур в СВЧ диапазоне длин волн.
Ключевые слова: оптические явления, СВЧ-диапазон, коэффициент отражения, коэффициент передачи, слоистые среды, моделирование структуры.

Currently the direction associated with the transfer of the results of the simulation of electromagnetic wave propagation in the microwave range of the optical range, and vice versa has been received significant development. Such a process, on the one hand, allow to clarify the mechanism of interaction of light with the media having certain features of the structure, by moving from a phenomenological models to the microscopic, and on the other – to determine the approaches to the creation meta-media having certain characteristics, different from those of real natural structures. In this paper, a theoretical consideration of the possibility of creating artificial gyrotropic media with the specified parameters on the basis of metal and metal-dielectric structures in the microwave range of wavelengths is given.
Keywords: optical phenomena, the microwave range, the reflection coefficient, transmission coefficient, layered media, modeling of the structure.

Введение. В работе предложена модель гиротропной среды на основе описания планарной микроструктуры материала в виде слоев с выраженной анизотропией проводимости. Подобный слой может рассматриваться, как идеальный поляризатор электромагнитной волны. Моделью элементарной ячейки такой среды в СВЧ-диапазоне длин волн является совокупность последовательно размещенных двух проволочных решеток, повернутых друг относительно друга на малый угол α.

Теоретические расчеты. Если между скрещенными поляризатором и анализатором поместить еще один поляризатор, ориентированный отлично от каждого из первой пары, то такая система будет пропускать волну, несмотря на то, что начальный и конечный элементы скрещены. Такая система уже может рассматриваться как устройство для поворота поляризации на девяносто градусов. Как известно, для технических целей больший поворот не нужен. Естественно, коэффициент передачи такой системы по амплитуде в лучшем случае симметричного расположения составляет 50 % (без учета потерь на отражение), однако система может быть дополнена, при этом коэффициент передачи возрастает. Так, уже при двух симметрично расположенных промежуточных поляризаторах коэффициент передачи возрастает до 65 %, при трех – до 79 % и т. д. Как нетрудно показать, в пределе при числе промежуточных элементов, стремящемся к бесконечности, коэффициент передачи как по амплитуде, так и по мощности стремится к единице. Естественно, результат является сугубо прикидочным без учета поглощения и переотражения в структуре, но, тем не менее, позволяет судить о возможности подобного подхода к моделированию гиротропной среды в СВЧ-диапазоне, где поляризующее устройство может быть легко реализовано путем применения проводящих структур.

В качестве поляризатора в СВЧ диапазоне длин волн может быть использована среда с выраженной анизотропией проводимости либо ее модель, простейшей из которых представляется решетка из линейных элементов, расстояние между которыми существенно меньше половины длины волны. В этом случае волна поперечной поляризации экспоненциально затухает, причем показатель экспоненты определяется, как толщиной структуры, так и расстоянием между элементами. В идеале, при расстоянии между элементами равном нулю, волна окажется полностью поляризованной при нулевой толщине структуры, которая будет пред-

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

ставлять собой планарный поляризатор. Такое представление позволяет рассмотреть модель гиротропной среды типа холестерического кристалла, в котором каждый отдельный слой мы будем представлять, как идеальный поляризатор, а гиротропию – как поворот каждого последующего слоя на некоторый, малый в общем случае, постоянный угол. Структура обладает локальной (в пределах слоя) анизотропией и гиротропией в направлении нормали. Элементарной ячейкой структуры является пара соседних слоев, расположенных параллельно друг другу на некотором расстоянии, в общем случае, не связанном с длиной волны и развернутых на некоторый угол, меньший 90 градусов [1]. Рассмотрим прохождение волны с поляризацией, соответствующей ориентации входного слоя, и отражение от нее с учетом переотражений внутри ячейки. При учете потери полуволны при отражении от металлической поверхности для эффективных коэффициентов передачи и отражения можно получить соответственно:

$$\theta_{эфф} = \frac{-2i\cos\alpha\sin\varphi e^{i2\varphi}}{1-\cos^2\alpha e^{i2\varphi}} = 2iA\cos\alpha\sin\varphi, \quad (1)$$

$$\Gamma_{эфф} = -\frac{\sin^2\alpha e^{i2\varphi}}{1-\cos^2\alpha e^{i2\varphi}} = A\sin^2\alpha, \quad (2)$$

где a – угол относительного разворота слоев, а φ – фазовый набег при прохождении электромагнитной волны между слоями структуры.

$$A = \frac{-e^{i2\varphi}}{1-\cos^2\alpha e^{i2\phi}}.$$

Интерес представляет соответствие модели крайним случаям. Если слои не развернуты, то структура должна быть полностью прозрачной. Действительно, если $\varphi = 0$, то

$$A = \frac{e^{i\varphi}}{2i\sin\varphi},$$

и $\theta_{эфф} = e^{i2\varphi}$. При совмещении слоев ($\varphi = 0$) $\theta_{эфф} = 1$ и $\Gamma_{эфф} = 0$, что и следовало ожидать. В другом крайнем случае, при $\alpha = \pi/2$, структура должна быть полностью отражающей. Действительно, при этом

$$A = e^{i2\varphi}$$

и $\theta_{эфф} = 0$, $\Gamma_{эфф} = -e^{i2\varphi}$.

При совмещении обоих слоев ($\varphi = 0$) структура должна вести себя, как сплошная металлическая поверхность при любом отличном от нуля $a \neq 0$. Это обусловлено нашим предположением об идеальности поляризатора. Так как последний представляет собой решетку с бесконечно малым шагом, то при пересечении двух таких решеток под любым отличным от нуля углом образуется ячеистая структура с бесконечно малым размером ячейки в любом направлении, что соответствует бесконечно быстрому затуханию волны любой поляризации. В то же время, в силу требования сохранения энергии волны, коэффициент отражения должен быть равным единице. Действительно, при осуществлении предельного перехода мы получаем $\Gamma_{эфф} = 1$ и $\theta_{эфф} = 0$, что как раз и соответствует отмеченным особенностям. Следует отметить, что создание идеального поляризатора типа описанной структуры не представляется возможным. Поляризатор, созданный из конечного числа макроскопических элементов, будет иметь конечный размер расстояния между отдельными элементами. При совмещении поляризаторов будет образовываться ячеистая структура, максимальный (диагональный) размер которой будет зависеть от расстояния между дискретами и угла их разворота. Структура будет пропускать без ослабления волны тех поляризаций, для которых будет выполняться условие превышения размера сечения элементарной ячейки половины длины волны. Для остальных поляризаций при распространении в среде амплитуда будет затухать по экспоненте. В критическом случае, когда размер большой диагонали ромба будет равен половине длины волны, такую искусственную среду можно рассматривать, как совокупность скрученных одномодовых волноводов, а сам процесс вращения плоскости поляризации – как распространение волны в таком волноводе. Таким образом, описываемый механизм гирации можно рассматривать, как волноводный.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

Рассмотрим прохождение волны через совокупность слоев и отражение от нее. Для этого получим рекуррентные формулы для прохождения через структуру, содержащую *n + 1* слой, в приближении, что известны эффективные коэффициенты для структуры из n слоев. В этом случае, проводя процедуру, аналогичную проделанной выше при определении эффективных коэффициентов в случае двух слоев, заменяя параметры одного из слоев на эффективные, можно получить

$$\Gamma_{n+1} = \Gamma_n + \frac{\theta_n^2 \Gamma_{эфф}}{1 - \Gamma_n \Gamma_{эфф}}, \tag{3}$$

$$\theta_n^2 = \frac{\theta_n \theta_{эфф}}{1 - \Gamma_n \Gamma_{эфф}} . \tag{4}$$

Очевидно, что коэффициент передачи является симметричным относительно замена порядка добавления очередного слоя к структуре. Аналогичное требование должно быть применено и к эффективному коэффициенту отражения, что приводит к соотношению:

$$\Gamma_n + \frac{\theta_n^2 \Gamma_{эфф}}{1 - \Gamma_{эфф} \Gamma_n} = \Gamma_{эфф} + \frac{\theta_n^2 \Gamma_n}{1 - \Gamma_n \Gamma_{эфф}} .$$

При обращении любого из коэффициентов отражения в ноль, среда будет полностью прозрачной. Использование реальных материалов при создании модели предполагает наличие поглощения ввиду конечности значения проводимости. В этом случае выражения для коэффициентов претерпевают некоторые изменения. С учетом сказанного

$$A = -\frac{e^{i2\varphi}}{1 - \Gamma^2 \cos^2 \alpha e^{i2\varphi}},$$

где Γ – модуль коэффициента ослабления. Тогда

$$\Gamma_{эфф} = A\Gamma \sin^2 \alpha$$

и

$$\theta_{эфф} = 2iA \cos\alpha \sin\varphi .$$

Интерес представляют структуры с числом элементов, стремящимся к бесконечности, и соответственно, с α и φ, стремящимися к нулю, т. е. – модель сплошной гиротропной среды. В этом случае логичным будет предположение о том, что добавление следующего слоя при большом их числе будет приводить к малым изменениям как коэффициента передачи, так и коэффициента отражения.

$$\Gamma_{n+1} \approx \Gamma_n .$$

Тогда из выражений (3) и (4) с учетом (1) и (2) для коэффициента отражения можно получить после некоторых преобразований приближенное выражение:

$$\Gamma_n = -1 + 2\left(\frac{\sin\varphi}{\sin\alpha}\right)^2 + 4i\frac{\sin\varphi}{\sin\alpha}\frac{\sin\left(\frac{\alpha+\varphi}{2}\right)\sin\left(\frac{\alpha-\varphi}{2}\right)}{\sin\alpha} . \tag{5}$$

При отмеченных условиях $\varphi, \alpha \to 0$ (5) может быть представлено в более простом виде

$$\Gamma_n \approx -1 + 2\left(\frac{\varphi}{\alpha}\right)^2 + i\varphi\left(1 - \left(\frac{\varphi}{\alpha}\right)^2\right) = -1 + 2X^2 + 2i\varphi\left(1 - X^2\right),$$

где $X = \frac{\varphi}{\alpha}$.

Поскольку $\varphi = \frac{kl}{N}$ (k – волновое число, l общая толщина структуры), а $\alpha = \frac{\Phi}{N}$, то $X = \frac{2\pi}{\xi}$, где ξ – угол поворота на пути, равном одной длине волны. Здесь N – общее число элементов структуры, Φ – результирующий угол поворота поляризации. Коэффициент отражения имеет комплексный вид

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

$$\Gamma_n = |\Gamma_n| e^{i\psi} = 1 - 2\xi^2 + i\varphi\left(1 - \xi^2\right), \tag{6}$$

причем

$$tg\,\psi = \frac{\varphi\left(1 - \xi^2\right)}{1 - 2\xi^2}$$

При выполнении условия $\varphi = \pm \frac{4\xi^2}{1 - \xi^2}$ происходит отражение волны. Поскольку полной прозрачности отвечает одновременное обращение в ноль как действительной, так и мнимой части выражения (6), что невозможно при φ, отличном от нуля, то коэффициент отражения никогда не обращается в ноль, и структура обладает ограниченным пропусканием.

Заключение. Проведенное теоретическое исследование показало, что в целом моделирование в области СВЧ диапазона оптических явлений является вполне перспективным направлением, позволяющим получить теоретические результаты, в целом согласующиеся с практическими. Полученные выражения для слоисто-неоднородной среды, содержащей конечное число элементов, показали, что в целом такая среда не отличается по своим оптическим свойствам от однородного элемента эквивалентной толщины при нормальном падении излучения.

Литература

1. Семченко, И.В. Преобразование поляризации электромагнитных волн при помощи спиральных излучателей / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 1–6.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 13.10.2015

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ