



УДК 535

**EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVE
PROPAGATION IN INHOMOGENEOUS MEDIA
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

Lomakina O.V. / Ломакина О.В.
c.t.s., as.prof / к.п.н., доц.

Selivanov U.T. / Селиванов Ю.Т.
d.t.s., as.prof. / д.т.н., доц.

Maksimenko A.V. / Максименко А.В.
undergraduate / магистрант

Somova M.A. / Сомова М.А.
undergraduate / магистрант

Golovkin A.Yu. / Головкин А.Ю.
undergraduate / магистрант

Аннотация. В работе экспериментально исследуется прохождение электромагнитных волн в квазиоптическом приближении через неоднородные приборы: линзы, призмы, псевдолинзы и плоскопараллельные пластинки с постоянным и переменным градиентом показателя преломления. Описана методика проведения экспериментов. В качестве неоднородных сред используются волноводные и металлоленточные структуры.

Ключевые слова: электромагнитная волна, неоднородная среда, линза, призма, показатель преломления.

Вступление

Известно, что оптика – раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, его распространение в различных средах и взаимодействие с веществом, а также способы генерации и регистрации света. Это широко разветвленная область исследований, взаимодействующая со многими областями: электродинамика, квантовая механика, физика твердого тела и др. Одна из важнейших традиционных задач оптики – получение изображений, соответствующих оригиналам как по геометрической форме, так и по распределению яркости решается главным образом геометрической оптикой с привлечением физической оптики. Обычно в курсах оптики в вузе рассматривается распространение света в однородных средах и однородных приборах: плоскопараллельных пластинах, призмах, линзах и т.п. Представляет несомненный интерес обратить внимание на распространение света в оптически неоднородных средах, где показатель преломления непрерывно изменяется от точки к точке и среда характеризуется градиентом показателя преломления. Градиенты показателя преломления возникают при распространении в среде мощного лазерного излучения (самофокусировка). В некотором смысле градиентная оптика перекликается с нелинейной. Физические эксперименты по распространению света в неоднородных средах подробно описал В.В. Майер [1]. Также подобными вопросами занимались авторы работ [2- 5].

Основной текст

В данной работе рассматривается в квазиоптическом приближении



распространение сантиметровых электромагнитных волн ($\lambda = 3,2$ см) в неоднородных приборах, которые рекомендуется использовать в качестве лекционных демонстраций и работ лабораторного практикума для студентов физических и радиофизических специальностей.

В качестве неоднородных сред в СВЧ диапазоне целесообразно использовать металлоленточные и волноводные структуры, позволяющие создавать достаточные градиенты показателя преломления.

1. Рассмотрим вопрос о прохождении электромагнитных волн через *неоднородные плоскопараллельные пластинки*.

На рис.1 представлена выполненная в квазиоптическом приближении неоднородная металлоленточная структура в форме прямоугольного параллелепипеда. Эквивалентный показатель преломления металлоленточной структуры для электромагнитной волны, электрический вектор \vec{E} которой параллелен лентам, зависит от расстояния a между ними

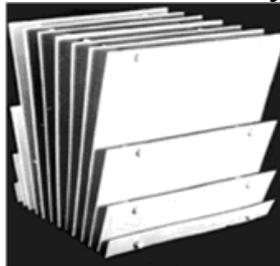


Рис. 1 Неоднородная металлоленточная структура

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}. \quad (1)$$

Так как при основании прямоугольного параллелепипеда между лентами $a_1 = 18$ мм, а при его вершине - $a_2 = 40$ мм, то показатель преломления искусственной неоднородной среды изменяется непрерывным образом в вертикальном направлении от $n_1 = 0,46$ до $n_2 = 0,92$. Вследствие этого фазовая скорость волн ($v = \frac{c}{n}$, где c – скорость света в вакууме) при основании неоднородного параллелепипеда будет больше, чем при его вершине.

Эксперимент проводят так. Устанавливают клистронный генератор (1) СВЧ, нагруженный рупорной антенной, и приемник волн (2) с рупорной антенной на одной прямой на расстоянии 1,5 м. СВЧ-колебания генератора модулируются низкочастотным сигналом, в качестве индикатора интенсивности принимаемых волн используется осциллограф или микроамперметр (рис. 2). Включив все приборы, наблюдают прямолинейное прохождение волн в воздухе от источника (1) к приемнику (2).

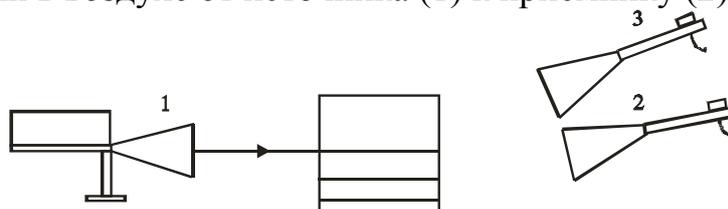


Рис. 2 Схема для проведения эксперимента



Устанавливают на пути электромагнитных волн (рис. 2) неоднородный параллелепипед (рис. 1) так, чтобы волны распространялись вдоль его листов, а электрический вектор \vec{E} волны был параллелен центральным металлическим листам структуры. Отмечают отсутствие прямолинейного распространения в направлении приемной антенны (2), вследствие искривления лучей в неоднородной среде. Перемещая приемную антенну вверх от основания параллелепипеда, то есть в положение (3), снова отмечают прием электромагнитных волн прежней интенсивности. Отклонение электромагнитных волн от прямолинейного направления составляет более 20° . Так как показатель преломления в описанной пластинке изменяется в вертикальном направлении нелинейно, то происходит некоторое уширение проходящего через неё пучка электромагнитных волн.



Рис. 3
Волноводная структура

Неоднородную пластинку в квазиоптическом приближении с постоянным градиентом показателя преломления можно изготовить на основе волноводной структуры (рис. 3), эквивалентный показатель преломления которой зависит от радиуса a сечения волноводов

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{3,42a} \right)^2}. \quad (2)$$

Показатель преломления в рассматриваемой пластинке изменяется с высотой по линейному закону от $n_1 = 0,37$ при радиусе нижних волноводов $a_1 = 10$ мм до $n_2 = 0,91$ при радиусе верхних волноводов $a_2 = 23$ мм, $\lambda = 3,2$ см. Следовательно, фазовая скорость $V_1 = \frac{c}{n_1}$ (c – скорость волн в вакууме) электромагнитных волн в нижней части плоскопараллельной пластинки будет больше фазовой скорости волн $V_2 = \frac{c}{n_2}$ в её верхней части.

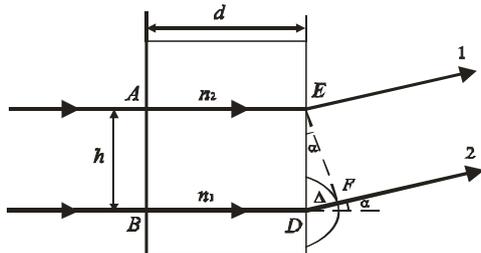


Рис. 4 Прохождение электромагнитных волн через неоднородную пластинку

Найдем угол α , на который отклоняются от прямолинейного направления распространения электромагнитные волны, проходящие «оптически» неоднородную пластинку. Расчет значительно упрощается, если учесть, что вследствие принудительного движения электромагнитных волн вдоль волноводов внутри плоскопараллельной пластинки не происходит искривление лучей, как это имеет место в естественных неоднородных средах. Пусть в начальный момент времени плоский волновой фронт одновременно достигает точек A и B пластинки, в которых показатель преломления, соответственно, равен n_2 и n_1 , причем $n_2 > n_1$ (рис. 4). Допустим, что за время τ волна проходит в верхней части пластинки расстояние AE . Так как в нижней части пластинки

волна проходит расстояние BF , то в момент времени $t = \tau$ волновой фронт будет представлять собой отрезок EF , который отклонился от первоначального направления на угол α . Так как в нижней части пластинки показатель преломления равен n_1 , то скорость распространения волн в ней будет больше, чем в верхней части, где он равен n_2 . Поэтому за время τ волна в нижней части пластинки пройдет большее расстояние, чем в верхней части, и фронт волны будет отклоняться от первоначального направления на угол α .



фазовая скорость волн v_1 больше, чем скорость v_2 в её верхней части, то за тот же промежуток времени τ волна пройдет расстояние BD и из точки D согласно принципа Гюйгенса произойдет излучение вторичной сферической волны радиусом DF . Положение волнового фронта, выходящего из пластинки, определяется линией EF , к которой перпендикулярны лучи 1 и 2.

Таким образом, вследствие различия фазовых скоростей волн, проходящих неоднородную пластинку, между лучами 1 и 2 возникает дополнительная геометрическая разность хода $\Delta = DF$, которая приводит к отклонению волнового фронта от первоначального направления распространения на угол α .

Из треугольника DEF имеем $\sin \alpha = \frac{DF}{DE} = \frac{\Delta}{h}$, где h - расстояние между точками A и B пластинки. Учитывая таутохронность рассматриваемых волн 1 и 2, имеем $\Delta = d(n_2 - n_1)$, d - толщина пластинки. Следовательно, угол отклонения лучей неоднородной пластинки с постоянным градиентом показателя преломления равен

$$\sin \alpha = \frac{d(n_2 - n_1)}{h} = d \cdot \text{grad}n. \quad (3)$$

Подставляя в эту формулу числовые значения величин $h=18,5$ см, $d=13$ см, $n_1=0,37$ и $n_2=0,91$, найдем угол отклонения электромагнитных волн неоднородной волноводной пластинкой: $\alpha = 20^0$, что совпадает с экспериментальными данными.

2. Рассмотрим *призму* с переменным показателем преломления. Из изложенного выше следует, что можно изготовить в СВЧ диапазоне неоднородную призму, которая не будет отклонять падающие на неё волны.



Рис. 5 Неоднородная волноводная призма

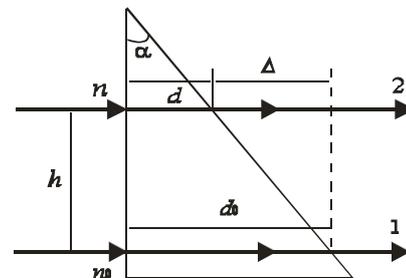


Рис. 6 Прохождение волн через призму

Найдем закон изменения показателя преломления в «оптически» неоднородной волноводной призме (рис. 5). Очевидно, для того, чтобы волны 1 и 2 (рис. 6) не отклонялись призмой от направления прямолинейного распространения, необходимо, чтобы они были таутохронны, а их оптические пути одинаковы, то есть $\Delta + nd = n_0 d_0$, или

$$\Delta = n_0 d_0 - nd, \quad (4)$$

где d_0 - длина основания призмы, d - толщина призмы на высоте h от основания, n_0 и n - показатели преломления, соответственно, при основании



призмы и на высоте h от неё, Δ - геометрическая разность хода указанных волн вне призмы. Из рис. 6 видно, что $d = d_0 - \Delta$.

Учитывая, что

$$\Delta = h \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (5)$$

где α - угол при вершине призмы, получаем

$$d = d_0 - h \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (6)$$

Подставляя формулы (5) и (6) в выражение (4), найдем изменение показателя преломления n с высотой h призмы

$$n = \frac{n_0 d_0 - h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{d_0 - h \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (7)$$

Градиент показателя преломления в волноводной неоднородной призме не является постоянной величиной и изменяется с высотой призмы. Действительно, из формулы (7) имеем

$$\operatorname{grad} n = \frac{dn}{dh} = \frac{d_0(n_0 - 1)}{(d_0 - h \cdot \operatorname{tg} \alpha)^2}.$$

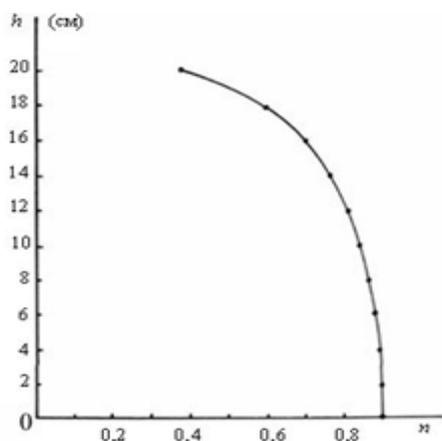


Рис. 7 Графическая зависимость



Рис. 8 Однородная волноводная призма

Зависимость показателя преломления в волноводной неоднородной призме показана на рис. 7. Волноводная неоднородная призма (рис. 5) изготовлена при следующих исходных данных: угол при вершине призмы равен $\alpha = 40^\circ$, показатель преломления при основании призмы $n_0 = 0,9$ при радиусе волноводов $a = 22$ мм, длина волноводов при основании призмы равна $d_0 = 19,5$ см. Показатель преломления призмы при её вершине на высоте $h = 20$ см равен $n = 0,37$ при $a = 10$ мм.

Следует показать, что однородная волноводная призма (рис. 8) с постоянным показателем преломления ($n = 0,63$ при $a = 12$ мм) отклоняет электромагнитные волны от прямолинейного направления на угол $\gamma = 17^\circ$.

3. Рассмотрим линзу с переменным показателем преломления. На рис. 9 и 10 показаны волноводные плосковогнутые линзы, имеющие одинаковый радиус кривизны $R = 31,5$ см. Однородная линза изготовлена из волноводов одинакового радиуса поперечного сечения $a = 10$ мм и имеет постоянный показатель преломления $n_0 = 0,37$. Так как $n_0 < 1$, то данная линза является



собирающей. Её фокусное расстояние в соответствии с формулой $\frac{1}{f} \approx (1-n_0)\frac{1}{R}$ равно $f = 50$ см. Данная линза позволяет увеличить интенсивность принимаемого сигнала более чем в два раза. Неоднородная линза (рис. 9) не обладает фокусирующим действием, так как её фокусное расстояние равно бесконечности.

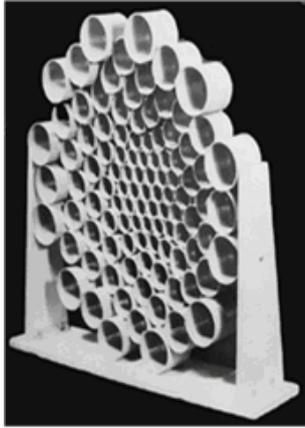


Рис. 9 Неоднородная плосковыгнутая линза



Рис. 10 Однородная плосковыгнутая линза

Найдем закон изменения показателя преломления в «оптически» неоднородной волноводной линзе (рис. 9), не обладающей фокусирующим действием. Из рис. 11 видно, для того чтобы, например, волны 1 и 2 не изменяли своего направления при прохождении неоднородной линзы, необходимо, чтобы они были таутохронны, а их оптические пути были одинаковы, то есть

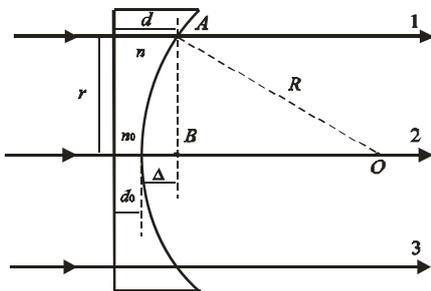


Рис. 11 Прохождение волн через неоднородную линзу

$$nd = n_0d_0 + \Delta, \quad (8)$$

где n_0 и n – показатели преломления, соответственно, в центре линзы и на расстоянии r от него, d_0 и d – толщина линзы в рассматриваемых точках, Δ – геометрическая разность хода волн вне линзы. Учитывая, что $d = d_0 + \Delta$, выражение (8) можно записать в виде

$$\Delta = \frac{d_0(n-n_0)}{1-n}. \quad (9)$$

С другой стороны, из треугольника AOB имеем $R^2 = r^2 + (R-\Delta)^2$. Откуда находим

$$\Delta = R - \sqrt{R^2 - r^2}. \quad (10)$$

Исключая из уравнений (9) и (10) геометрическую разность хода Δ , найдем радиальное изменение показателя преломления n в линзе в направлении r

$$n = \frac{R - \sqrt{R^2 - r^2} + n_0d_0}{R - \sqrt{R^2 - r^2} + d_0}. \quad (11)$$



Волноводная неоднородная линза (рис. 9) выполнена при следующих исходных данных: толщина линзы в центре $d_0 = 0,5$ см, радиус сферической поверхности $R = 31,5$ см, показатель преломления в центре линзы $n_0 = 0,37$ при радиусе центрального волновода $a = 10$ мм. При проведении опытов с волноводной неоднородной линзой необходимо, чтобы плоский волновой фронт, падающий на неё, был перпендикулярен волноводной структуре.

4. Рассмотрим *фокусирующие и рассеивающие системы* с переменным показателем преломления. В оптически однородных линзах, волны, собираемые в фокусе, несмотря на различие геометрических путей, имеют одинаковый оптический путь. Это достигается соответствующим изменением толщины линзы при постоянном показателе преломления. В оптически неоднородных линзах, то есть в псевдолинзах, постоянство оптических путей для волн, собираемых в её фокусе, достигается соответствующим изменением показателя преломления в пластинке постоянной толщины. Другими словами, псевдолинза представляет собой плоскопараллельную пластинку с осесимметричной неоднородностью показателя преломления. Видимо, впервые опыт по фокусировке световых волн с помощью псевдолинзы поставил известный американский физик Роберт Вуд. Однако поставить соответствующий опыт в лекционных условиях чрезвычайно трудно.

Найдем закон изменения показателя преломления в волноводной псевдолинзе (рис. 12). Из рис. 13 видно, что геометрическая разность хода между центральной волной $1'$, проходящей через точку O вдоль оптической оси, и волной $2'$, пересекающей неоднородную пластинку на расстоянии $r = OA$ от центра O псевдолинзы, равна

$$\Delta = AB = AF - BF = AF - OF = AF - f, \quad (12)$$

где f – фокусное расстояние псевдолинзы. Из треугольника AOF имеем

$$AF = \sqrt{f^2 + r^2}.$$

Подставляя это выражение в формулу (12), получим

$$\Delta = \sqrt{f^2 + r^2} - f. \quad (13)$$



Рис. 12 Псевдолинза

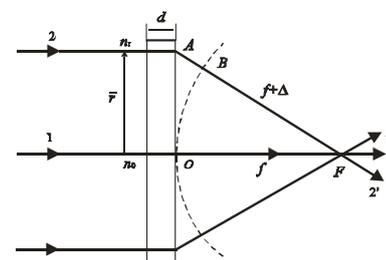


Рис. 13 Прохождение волн через псевдолинзу

Чтобы скомпенсировать геометрическую разность хода Δ рассматриваемых волн, необходимо, чтобы величина Δ равнялась оптической



разности хода волн 1' и 2' в неоднородной пластинке, то есть

$$\Delta = d(n_0 - n_r), \quad (14)$$

где d – толщина пластинки, n_0 и n_r – показатели преломления, соответственно, в центре псевдолинзы и на расстоянии r от её центра. Исключая из выражений (13) и (14) геометрическую разность хода Δ , найдем закон изменения показателя преломления n_r в псевдолинзе вдоль радиального направления r

$$n_r = \frac{n_0 d + f - \sqrt{f^2 + r^2}}{d}. \quad (15)$$

Псевдолинза (рис. 12) представляет собой пачку волноводов одинаковой длины $d = 5,3$ см, но различного поперечного сечения. Вследствие изменения поперечного сечения цилиндрических волноводов изменяется показатель преломления в плоскопараллельной пластинке. Изменение показателя преломления вдоль радиального направления в волноводной псевдолинзе соответствует формуле (15). В центре псевдолинзы показатель преломления равен $n_0 = 0,95$ при радиусе центрального волновода $a_0 = 30$ мм. На максимальном расстоянии от центра псевдолинзы равном $r = 18$ см показатель преломления равен $n_r = 0,37$ при радиусе сечения волноводов $a = 10$ мм. При изготовлении псевдолинзы её фокусное расстояние выбрано равным $f = 50$ см. Радиальное изменение показателя преломления в волноводной псевдолинзе показано сплошной линией на рис.14. Опыт по фокусировке электромагнитных волн с помощью волноводной псевдолинзы проводят следующим образом. Устанавливают источник и приемник электромагнитных волн на расстоянии 2,5 м друг от друга. По осциллографу, соединенному с приемной антенной, замечают величину принимаемого сигнала. Установив перед приемной антенной псевдолинзу на расстоянии 0,5 м от неё, замечают значительное увеличение интенсивности принимаемого сигнала.

Очевидно, в рассеивающей псевдолинзе показатель преломления должен изменяться противоположным образом, по сравнению с собирающей псевдолинзой. Нетрудно показать, что в рассеивающей псевдолинзе показатель преломления в радиальном направлении r должен изменяться по закону

$$n_r = \frac{n_0 d - f + \sqrt{f^2 + r^2}}{d}. \quad (16)$$

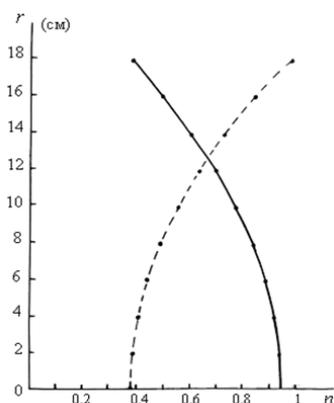


Рис. 14 Графическая зависимость

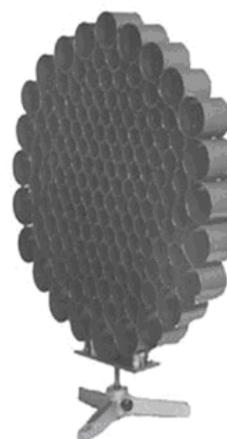


Рис. 15 Рассеивающая псевдолинза



На рис. 15 представлена волноводная рассеивающая псевдолинза для электромагнитных волн сантиметрового диапазона. Она состоит из волноводов одинаковой длины $d = 5,3$ см, но различного поперечного сечения. Эквивалентный показатель преломления в рассеивающей псевдолинзе изменяется в соответствии с формулой (16) от $n_0 = 0,37$ при радиусе центрального волновода $a_0 = 10$ мм до $n_r = 0,95$. Радиальное изменение показателя преломления в рассеивающей псевдолинзе показано пунктирной линией на рис. 14. При расчете псевдолинзы мнимое фокусное расстояние выбрано равным $f = 50$ см.

Опыт показывает, что при установлении рассеивающей псевдолинзы перед приемной антенной на расстоянии 0,5 м интенсивность принимаемого сигнала уменьшается до нуля.

Перемещая приемную антенну в плоскости перпендикулярной к главной оси псевдолинзы, отмечают прием электромагнитных волн. Следовательно, пучок электромагнитных волн, выходящих из псевдолинзы представляет собой поверхность в форме конуса, ось которого совпадает с главной оптической осью псевдолинзы. Для большей наглядности опытов с псевдолинзами можно использовать индикатор круговой развертки, с помощью которого регистрируются полярные диаграммы волновых фронтов.

Из изложенного можно прийти к выводу, что система, состоящая из обычного плоского зеркала и плоскопараллельной пластинки с осесимметричным изменением показателя преломления, может выполнять роль фокусирующего или рассеивающего прибора, работающего на отражение. Найдем закон изменения показателя преломления в плоскопараллельной пластинке фокусирующего псевдозеркала. Из рис. 16 следует, что геометрическая разность хода между волнами 1' и 2' равна

$$\Delta = AB = AF - BF = AF - OF = \sqrt{r^2 + f^2} - f. \quad (17)$$

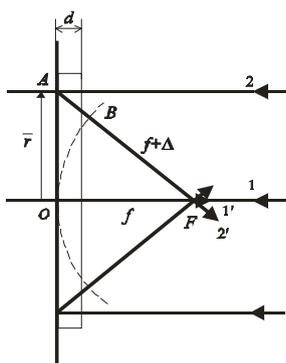


Рис. 16

Для того, чтобы лучи 1' и 2' имели одинаковый оптический путь, необходимо, чтобы геометрическая разность хода Δ рассматриваемых волн равнялась оптической разности хода тех же лучей в неоднородной плоскопараллельной пластинке. Учитывая, что рассматриваемые волны дважды проходят оптически неоднородную пластинку, имеем

$$\Delta = 2d(n_0 - n_r), \quad (18)$$

где d – толщина неоднородной пластинки, n_0 и n_r – показатели преломления, соответственно, в центре пластинки и на расстоянии r от её центра. Исключая из уравнений (17) и (18) величину геометрической разности хода Δ волн, найдем изменение показателя преломления в оптически неоднородной пластинке радиального направления n_r :

$$n_r = \frac{2n_0d + f - \sqrt{f^2 + r^2}}{2d}.$$

Эксперимент по фокусировке электромагнитных волн с помощью плоского



псевдозеркала проводится в следующей последовательности. Устанавливают перед источником и приемником сантиметровых электромагнитных волн на расстоянии одного метра плоскую металлическую пластинку диаметром 40 см, которая выполняет роль обычного зеркала. Угол падения волн на зеркало выбирают близким к нулю. В качестве приемника используют зонд-детектор. По осциллографу замечают величину принимаемого сигнала при отражении от зеркала. Устанавливают перед зеркалом волноводную фокусирующую псевдолинзу (рис. 12). Замечают увеличение интенсивности отраженного сигнала более чем в два раза. Следовательно, действие системы, состоящей из плоского зеркала и плоской неоднородной пластинки с осесимметричным изменением показателя преломления, эквивалентно действию вогнутого сферического зеркала. Очевидно, действие системы, состоящей из плоского зеркала и плоской рассеивающей псевдолинзы (рис. 15) эквивалентно действию выпуклого сферического зеркала. Демонстрационный опыт подтверждает этот вывод.

Более просто можно изготовить фокусирующую псевдолинзу на базе металлоленточной структуры, которая выполнена в форме цилиндра диаметром 35 см и толщиной лент $d = 69$ мм, фокусное расстояние $f = 50$ см. В центре псевдолинзы (рис. 17) расстояние между лентами равно $a = 40$ мм, что соответствует показателю преломления (1) $n = 0,91$. Расстояние между лентами по периферии равно $a = 18$ мм, что соответствует $n = 0,45$. Чтобы обеспечить изменение показателя преломления в соответствии с законом (15), необходимо, чтобы расстояние между лентами в радиальном направлении влево и вправо от центра изменялись следующим образом: $a = 40; 32; 29; 25,4; 22,4; 20,5; 18$ мм.

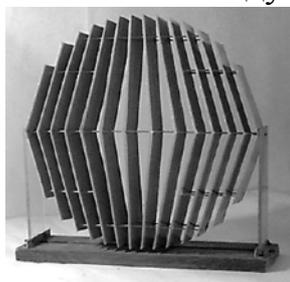


Рис. 17 Фокусирующая псевдолинза

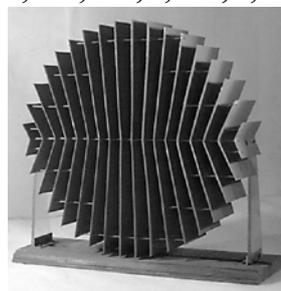


Рис. 18 Рассеивающая псевдолинза

Рассеивающая металлоленточная псевдолинза показана на рис. 18. Она также выполняется в форме цилиндра диаметром 35 см, но толщиной лент $d = 91$ мм, $f = 50$. В центре псевдолинзы расстояние между лентами $a_0 = 18$ мм ($n_0 = 0,45$). Расстояние между лентами по периферии равно $a = 18$ мм ($n = 0,80$). Расстояние между лентами в радиальном направлении от центра псевдолинзы влево или вправо изменяется так: $a_0 = 18; 18; 18; 18; 18,6; 19; 19,3; 21; 22,5$.

Заключение и выводы

Были рассмотрены вопросы распространения сантиметровых электромагнитных волн в неоднородных приборах: металлоленточные и волноводные структуры, которые позволяют создавать достаточные градиенты



показателя преломления.

Для некоторых приборов описан метод их изготовления.

Приведено описание последовательности в проведении эксперимента, где полученные результаты полностью совпадают с теоретическими расчетами.

Литература

1. Майер В.В. Свет в оптически неоднородной среде. – М.: Изд-во Физматлит, 2006. – 232 с.

2. Кривцун А.М., Сетейкин А.Ю. Исследование процесса распространения света в неоднородных биологических средах // Физика: Фундаментальные и прикладные исследования, образование (ФФПИО-2009) – Благовещенск, 2009. С.264-266.

3. Суханов Д.Я., Завьялова К.В. Модель распространения радиоволн в контрастных неоднородных средах // Известия высших учебных заведений. Физика – Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2015. Т.58, №10-3. С. 18-21.

4. Курбонов И., Игболов С.И. Волны в однородных и неоднородных нелинейных средах // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук, 2010. №3. С.25-33.

5. Молотков Н.Я. Радиоволны в демонстрационном эксперименте по оптике. – Киев: Вища школа, 1981. – 103 с.

References:

1. Myer V.V. *Light in an optically heterogeneous environment*. - M.: Fizmatlit, 2006. - 232 S.

2. Kryvtzun A.M., Setykin A.Y. *Research into the process of light distribution in heterogeneous biological environments / Physics: Fundamental and Applied Research, Education (FFIO-2009) - Blagoveshchensk, 2009. S.264-266.*

3. Sukhanov D.Y., Kvalyalova K.V. *Model of radio wave distribution in contrasting heterogeneous environments / Izvestia of higher education institutions. Physics - Tomsk: The National Research University of Tomsk, 2015. T.58, No10-3. S. 18-21.*

4. Kurbonov I., Igbolov S.I. *Waves in homogeneous and heterogeneous non-linear environments / Izvestia of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Physics, Mathematics, Chemical, Geological and Technical Ngauk, 2010. No. S.25-33.*

5. Molotkov N.Y. *RadioWaves in a demonstration experiment on optics*. - Kiev: The School of The Fist, 1981. - 103 s.

Abstract. *The work experimentally explores the passage of electromagnetic waves in a quasi-optical approximation through heterogeneous devices: lenses, prisms, pseudolenses and flat-parallel plates with a permanent and variable gradient of the refraction indicator. The method of conducting experiments is described. Wave and metal structures are used as heterogeneous environments.*

Key words: *electromagnetic wave, heterogeneous environment, lens, prism, refraction rate.*

Статья отправлена: 29.10.2019 г.

© Ломакина О.В.