

В. И. Безбородов, О. С. Косяк, Е. М. Кулешов, В. В. Ячин*

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: olegkosiak@mail.com

**Радиоастрономический институт НАН Украины*

4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина

E-mail: yachin@rian.kharkov.ua

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ФАЗОВЫЕ СЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ ФОРМЫ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

При построении поляризационных радиоизмерительных трактов терагерцевого диапазона широкое применение находят преобразователи поляризации, основными элементами которых являются дифференциальные фазовые секции (ДФС). Применение субмиллиметровых волн позволяет осуществить исследования в области радиоастрономии, радиоспектроскопии, биологии, медицине, физики атмосферы и т. д. В связи с тем, что в терагерцевом диапазоне используются квазиоптические линии передач, оправдан переход к оптическим принципам построения ДФС с применением диэлектриков, обладающих двойным лучепреломлением. Данное свойство имеют некоторые кристаллы (сапфир, исландский шпат, кварц и т. д.). В работе рассмотрены искусственные диэлектрические структуры, обладающие двулучепреломлением формы с периодом структуры, соизмеримым с длиной волны (известны классические методы расчета таких структур с периодом, значительно меньшим длины волны). Рассмотрены искусственные диэлектрические структуры, обладающие двулучепреломлением формы с периодом структуры, соизмеримым с длиной волны. Был применен численный метод интегральных функционалов в частотной области для многомодовой задачи рассеяния. Этот метод основан на трехмерных интегральных уравнениях для эквивалентного электрического и магнитного тока поляризации периодической среды. Также рассмотрены условия согласования таких структур со свободным пространством. Согласование осуществляется с помощью диэлектрических слоев. Проведено экспериментальное исследование макетов таких ДФС, результат которых подтвердил правильность выбора таких структур и условий их согласования. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, двулучепреломление формы, квазиоптика, дифференциальная фазовая секция.

При построении поляризационных радиоизмерительных трактов терагерцевого (ТГц) диапазона (0,1...10 ТГц) широко используются дифференциальные фазовые секции (ДФС), причем они могут выполнять как отдельную функцию, так и являться элементами устройств. Например, 90° ДФС являются преобразователями линейной поляризации в круговую или наоборот, а 180° ДФС могут быть использованы в качестве вращателей плоскости поляризации. Они же являются элементами поляризационных фазовращателей и сдвигателей частоты.

Достаточно привлекательным в ТГц диапазоне является переход к известным оптическим принципам построения ДФС в виде пластин с двойным лучепреломлением, выполненных, например, из кристаллического кварца, сапфира, исландского шпата и других кристаллов. Способность кристаллов к двойному лучепреломлению определяется свойством молекул, составляющих кристаллы. Двойное лучепреломление может быть получено также в периодических субволновых структурах, свойства которых можно изменять. Это так называемое двулучепреломление формы. Классическим примером такой структуры является многослойный набор чередующихся диэлектрических пластин (рис. 1) с различными показателями преломления [1, 2]. Применение структур с двулучепреломлением формы особенно эффективно в ТГц диапазоне, в котором длины волн достаточно малы и их распространение может осуществляться в виде волновых пучков.

В случае, когда период t такой структуры значительно меньше длины волны, эффективные показатели преломления n_{0p} и n_{0s} для волн, поляризованных параллельно и ортогонально пластинам, и показатель двулучепреломления Δn_0 не зависят от частоты и соответственно равны:

$$n_{0p} = \sqrt{F\varepsilon_1 + (1-F)\varepsilon_2}, n_{0s} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{F\varepsilon_2 + (1-F)\varepsilon_1}}, \quad (1)$$

$$\Delta n_0 = n_{0p} - n_{0s},$$

где $F = t_1/t$ – коэффициент заполнения более плотной средой.

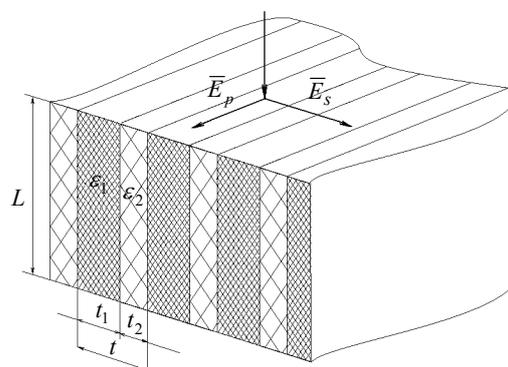


Рис. 1. Двулучепреломляющая структура из параллельных диэлектрических пластин

При изменении коэффициента заполнения F от 0 до 1 показатели преломления этой

структуры по осям анизотропии изменяются от показателя преломления менее плотной среды до показателя преломления более плотной среды, а показатель двулучепреломления Δn_0 имеет пиковый максимум в области $F \sim 0,6$ (рис. 2).

Длину секции L для получения требуемого дифференциального сдвига фаз $\Delta\varphi$ определяем как

$$L = \frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi\Delta n_0}. \quad (2)$$

Если период t соизмерим с длиной волны, то эффективные показатели преломления становятся частотно зависимыми и формула (1) неприменима [3].

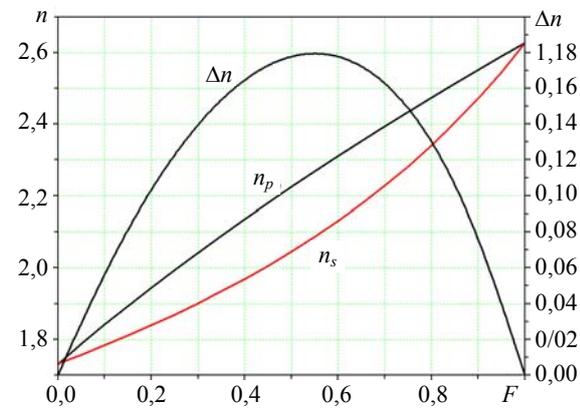


Рис. 2. Зависимости показателей преломления n_{op} и n_{os} и показателя двулучепреломления Δn_0 от коэффициента заполнения F для структуры слюда-лавсан

Для решения задачи рассеяния плоской монохроматической волны на решетке, состоящей из диэлектрических брусков без потерь, мы использовали численный метод интегральных функционалов в частотной области для многомодовой задачи рассеяния. Этот метод основан на трехмерных интегральных уравнениях для эквивалентного электрического и магнитного тока поляризации периодической среды [4]. Существование и единственность решения метода интегральных функционалов показано в работе [5]. Метод позволяет решать задачи рассеяния на многослойных двоякопериодических структурах с различными конфигурациями периода.

Для нахождения эффективных показателей преломления двулучепреломляющей структуры рассчитывалась зависимость фаз коэффициентов прохождения по осям анизотропии φ_p, φ_s от относительной длины $h = L/\lambda$. При этом во избежание влияния высших дифракционных гармоник период структуры ограничивается условием $t = \lambda/n_p$. Изменение фазы коэффициента прохождения на 360° соответствует изменению длины секции на величину $\Delta L = \lambda/n$ (или изме-

нению относительной длины секции на величину $\Delta h = \Delta L/\lambda$). Из этого следуют простые выражения для n_p и n_s :

$$n_p = 1/\Delta h_p, \quad n_s = 1/\Delta h_s. \quad (3)$$

На рис. 3 сплошными кривыми представлены фазовые характеристики для структур полистирол ($\varepsilon = 2,5$)–воздух и слюда ($\varepsilon = 6,9$)–лавсан ($\varepsilon = 3$) с относительным периодом $\kappa = t/\lambda = 0,35$ и коэффициентом заполнения $F = 0,6$. Частотные зависимости относительного изменения установившихся эффективных показателей преломления $n_p/n_{op}, n_s/n_{os}$ и показателя двулучепреломления $\Delta n/\Delta n_0$ для тех же структур представлены на рис. 4.

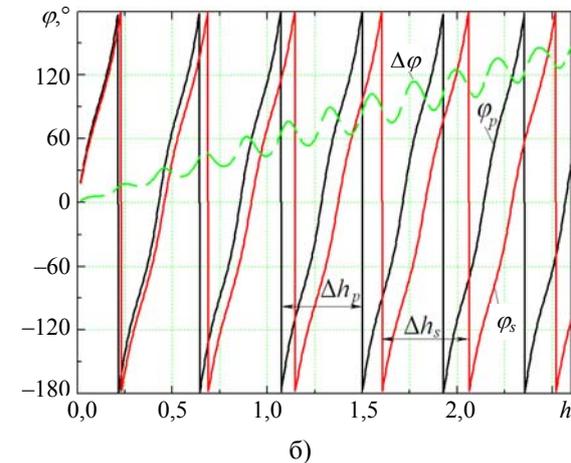
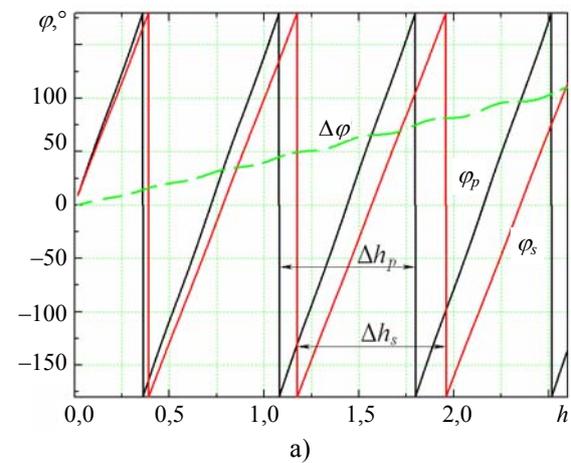


Рис. 3. Зависимости фаз коэффициентов прохождения по осям анизотропии φ_p, φ_s и их разность $\Delta\varphi$ от h для структур с $\kappa = t/\lambda = 0,35$ и $F = 0,6$: а) – полистирол–воздух; б) – слюда–лавсан

С ростом частоты эффективные показатели преломления несколько увеличиваются, а показатель двулучепреломления уменьшается, что приводит к тому, что для получения требуемого дифференциального сдвига фаз требуется

увеличение длины секции L . Это увеличение зависит от периода структуры κ и диэлектрических проницаемостей материалов, из которых состоит ДФС. Было установлено, что для получения требуемого дифференциального сдвига фаз параметры структуры полистирол–воздух с коэффициентом заполнения $F = 0,6$ и относительным периодом $\kappa \leq 0,2$ могут быть достаточно точно рассчитаны по формулам (1), а структура слюда–лавсан с тем же коэффициентом заполнения лишь при $\kappa \leq 0,1$. Для этих же структур с $\kappa = 0,2$ отклонение дифференциального сдвига фаз от расчетного составляло $\sim 10\%$ и $\sim 20\%$ соответственно, и требовалось увеличение длины секции на такую же величину. Отрицательный наклон зависимости показателя двулучепреломления от частоты может быть использован при создании широкополосных ДФС.

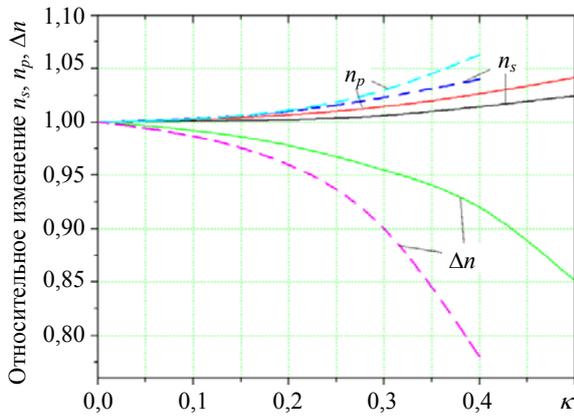


Рис. 4. Частотные зависимости относительного изменения установившихся значений n_p , n_s и Δn структур: сплошными линиями — полистирол–воздух, пунктирными — слюда–лавсан

Зависимости дифференциальных сдвигов фаз $\Delta\varphi$ от h для тех же структур представлены на рис. 3 пунктирными кривыми. Зависимости носят осциллирующий характер, а амплитуда осцилляции зависит от степени согласования структур с окружающей средой.

Известно согласование изотропных диэлектриков со свободным пространством при помощи размещения на его поверхности четвертьволнового просветляющего слоя. Диэлектрическая проницаемость этого слоя выбирается равной показателю преломления диэлектрика. В случае структуры, обладающей свойством двулучепреломления, показатель преломления различен по осям анизотропии. Тогда диэлектрическую проницаемость согласующего слоя целесообразно выбрать равной

$$\varepsilon = \sqrt{n_s n_p}. \quad (4)$$

Условие (4) можно выполнить как подбором диэлектрической проницаемости согласующего слоя, так и параметрами двулучепреломляющей структуры. На рис. 5 показан пример графического нахождения коэффициента заполнения для случая согласования с помощью четвертьволнового просветляющего слоя. Такое согласование возможно в том случае, когда диэлектрическая проницаемость согласующего слоя меньше показателя преломления более плотной среды в структуре, поэтому для структуры слюда–лавсан диэлектрическая проницаемость согласующего слоя $\varepsilon < 2,6$. Это может быть, например, тефлон ($\varepsilon = 2,07$) или полиэтилен ($\varepsilon = 2,5$). В первом случае коэффициент заполнения должен быть выбран равным $\sim 0,42$, а во втором $\sim 0,89$. Для структуры полистирол–воздух ε просветляющего слоя должна быть меньше 1,58. Мы использовали для этой цели пенополистирол ($\varepsilon \approx 1,27$).

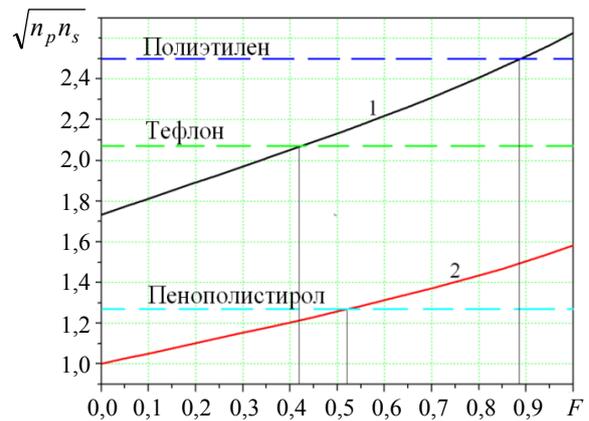


Рис. 5. Графическое определение коэффициента заполнения структуры ДФС при согласовании ее с помощью четвертьволнового просветляющего слоя: 1 — слюда–лавсан; 2 — полистирол–воздух

В случае полуволновых ДФС согласование возможно осуществить путем выбора соответствующей длины секции. ДФС будет согласована, если ее электрическая длина равна

$$\begin{cases} Ln_s = k\lambda/2, \\ Ln_p = (k+1)\lambda/2, \end{cases} \quad (5)$$

где k — целое число.

Такое согласование возможно если отношение $n_p/n_s = (k+1)/k$.

Определение условия такого согласования для структуры слюда–тефлон приведено на рис. 6. Наименьшее значение k , при котором согласование возможно, равно 6. При этом коэффициент заполнения F может быть 0,32 или 0,68.

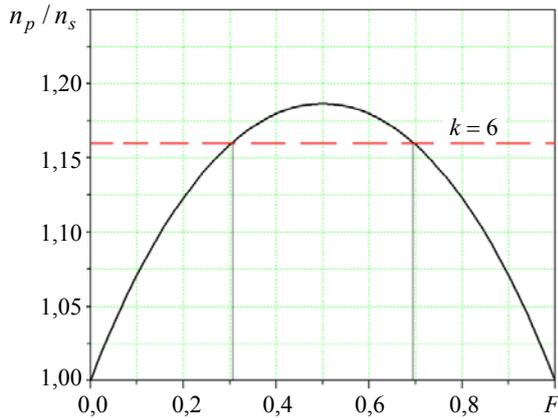
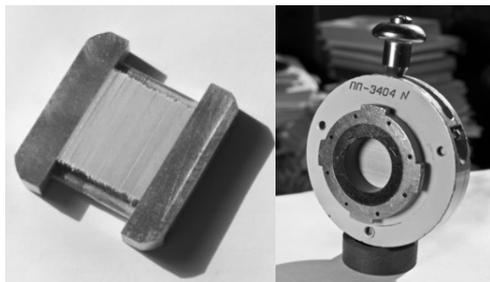
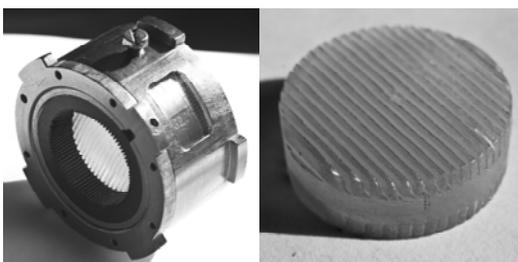


Рис. 6. Графическое определение коэффициента заполнения структуры слюда-тефлон полуволновой ДФС при согласовании ее посредством выбора длины

В выбранной нами части ТГц диапазона технологически достаточно легко изготовить ДФС как с периодом структуры значительно меньшим, так и соизмеримым с длиной волны. Одна из примененных нами технологий изготовления двулучепреломляющих структур заключается в наборе тонких диэлектрических пластин в кассете (рис. 7, а).



а)



б)

Рис. 7. Двулучепреломляющие структуры в виде: а) – набора диэлектрических пластин; б) – фрезерованных пазов и ДФС на их основе

При этом использовались слюдяные пластины, а также пленки из тефлона и лавсана. По второй технологии структуры выполнялись путем фрезерования воздушных пазов (рис. 7, б) в полистироле при выдерживании толщины несущей перемычки, кратной половине длины волны в исходном изотропном диэлектрике. Изготовленные

ДФС после согласования помещались в полый диэлектрический лучевод [6] с возможностью их вращения вокруг оси.

Экспериментальное исследование ДФС на основе двулучепреломления формы состоит в измерении коэффициента эллиптичности сигнала на выходе и коэффициентов отражения по осям анизотропии.

Исследования экспериментальных образцов ДФС проводились на частоте 0,14 ТГц на установках, собранных из квазиоптических устройств на базе полого диэлектрического лучевода диаметром 20 мм. Основная мода HE_{11} в таком лучевode имеет осесимметричное распределение амплитуды с практически плоским фазовым фронтом и линейной поляризацией [6].

Установка для измерения коэффициента эллиптичности сигнала на выходе ДФС (рис. 8) содержит: твердотельный генератор 1, волноводно-лучеводный переход 2, модулятор 3, аттенюатор 4, исследуемую ДФС 5 и анализатор поляризации, состоящий из вращающегося сочленения 6, поляризатора 7, волноводно-лучеводный переход 2 и квадратичного детектора 8.

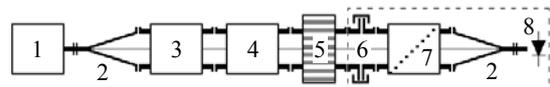


Рис. 8. Схема квазиоптической установки для измерения коэффициента эллиптичности

Коэффициент передачи на проход отсчитывался на линейной поляризации по разности показаний аттенюатора 4 при наличии и отсутствии ДФС в тракте. При измерении коэффициента эллиптичности сигнала на выходе ДФС согласованная двулучепреломляющая структура разворачивается вокруг оси лучевода на угол 45° относительно плоскости поляризации падающей линейно-поляризованной волны. Коэффициент эллиптичности рассчитывается по формуле $r = \sqrt{A_{\min} / A_{\max}}$, где A_{\min} и A_{\max} соответственно минимальное и максимальное показания на выходе детектора 8 при вращении анализатора поляризации. Абсолютные отклонения дифференциальных сдвигов фаз могут быть вычислены по формулам: $\delta = 90^\circ - 2 \arctg r$ для четвертьволновой секции и $\delta = 2 \arctg r$ – для полуволновой.

Установка для измерения коэффициента отражения от ДФС (рис. 9) отличается тем, что исследуемая ДФС 5 подключается через фазовращатель 9 в одно из плеч интерферометра Майкельсона, образованного пленочным делителем луча 10 и неподвижным отражателем 11, который для компенсации потерь в фазовращателе подключен ко второму плечу интерферометра через соответствующий отрезок ПДЛ 12.

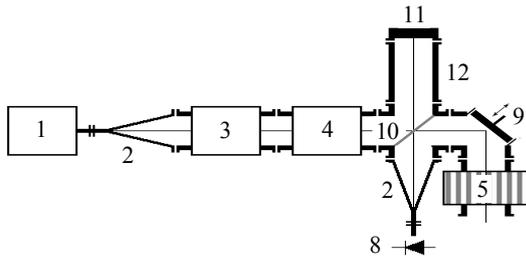


Рис. 9. Схема квазиоптической установки для измерения коэффициента отражения

При измерении коэффициентов отражения R_p , R_s двулучепреломляющая структура

устанавливается в лучевом соответствии параллельно и ортогонально плоскости поляризации падающей волны. При этом коэффициент отражения R вычисляется по формуле

$$R = 20 \log \left(\frac{1 - \sqrt{A_{\max} / A_{\min}}}{1 + \sqrt{A_{\max} / A_{\min}}} \right), \text{ дБ} \quad (6)$$

где A_{\min} и A_{\max} соответственно минимальное и максимальное показание на выходе детектора 8 при перестройке фазовращателя 9.

Результаты экспериментального исследования ДФС приведены в таблице.

Экспериментальное исследование ДФС

Тип ДФС	Параметры структуры	Согласование	Коэффициент эллиптичности r	Отклонение дифференциального сдвига фаз δ	Коэффициент передачи		Коэффициент отражения	
					B_p	B_s	R_p	R_s
$\Delta = 90^\circ$	слюда $t_1 = 0,13$ мм лавсан $t_2 = 0,19$ мм $L = 3,70$ мм	$\lambda/4$ – слой тефлона	0,95	3°	-0,1	-0,15	-24	-25
	полистирол $t_1 = 0,44$ мм воздух $t_2 = 0,36$ мм $L = 3,5$ мм	$\lambda/4$ – слой пенополистирола	0,93	4°	-0,15	-0,15	-22	-22
$\Delta = 180^\circ$	слюда $t_1 = 0,1$ мм тефлон $t_2 = 0,2$ мм $L = 4,8$ мм	Выбором длины	0,07	8°	-0,2	-0,2	-19	-20

Выводы. Впервые в ТГц диапазоне частот разработаны четвертьволновые и полуволновые ДФС с использованием эффекта двулучепреломления формы и выполнено их теоретическое и экспериментальное исследование.

Методом интегральных функционалов в частотной области для многомодовой задачи рассеяния рассчитана зависимость показателя двулучепреломления от частоты. В результате установлено, что при относительном периоде структуры $\kappa < 0,2$ эта зависимость слаба. Расчет таких структур с достаточной достоверностью может производиться по аналитическим формулам.

Рассмотрены возможности согласования таких ДФС с помощью четвертьволнового просветляющего слоя и посредством выбора длины секции.

В дальнейшем предполагается рассмотрение широкополосных и перестраиваемых ДФС на основе двулучепреломления формы и создание поляризационных фазовращателей и сдвигателей частоты ТГц диапазона.

Библиографический список

1. *Born M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – Oxford: Pergamon Press, 1965. – P. 651–653*
2. *Kirschbaum H. A Method of Producing Broad-Band Circular Polarization Employing an Anisotropic Dielectric / H. Kirsch-*

- baum, S. Chen // IRE Trans. On Microwave and Techniques. – 1957. – MIT-5, N 3. – P. 199–203.
3. *Kikuta H. Achromatic quarter-wave plates using the dispersion of form birefringence / H. Kikuta, Y. Ohira, K. Iwata // Appl. Opt. – 1997. – 36, N 7. – P. 1566–1572.*
4. *Yachin V. Substantiation of the field functional method as applied to scattering by a doubly periodic magnetodielectric structure / V. Yachin // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2006. – 46, N 91. – P. 1668–1673.*
5. *Грант 7-й Рамочной Программы ЕС «Extended Non-Destructive Testing of Composite Bonds» (проект ENCOMB), договор № 266226.*
6. *Кулешов Е. М. Измерения в суб-мм диапазоне волн / Е. М. Кулешов. – К.: Наук. думка, 1986. – P. 140–157.*

Рукопись поступила 19.05.2014.

V. Bezborodov, O. Kosiak, Ye. Kuleshov, V. Yachin

DIFFERENTIAL PHASE SECTIONS BASED ON FORM BIREFRINGENCE IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

The polarization transformers, main elements of which are differential phase section (DPS) are widely used while constructing the polarization radio paths of terahertz (THz) range. Sub-millimeter waves application allows to realize researches in radio astronomy, radio spectroscopy, biology, medicine, physics of the atmosphere, etc. Due to the fact that quasi-optical transmission lines are used in the THz frequency range, the transition to optical principles of DPS construction using dielectrics exhibiting birefringence is justified. Some of crystals (sapphire, iceland spar, quartz, etc.) possess this property. In this paper, some artificial dielectric structures possessing form birefringence with a period of

the structure comparable to the wavelength are considered. The classical methods of calculating such structures with a period much smaller than the wavelength are known. To solve the problem of dispersion of a plane monochromatic wave on a lattice consisting of dielectric bars without loss, we used a numerical method of integral functionals in the frequency domain for multi-mode dispersion problem. This method is based on three-dimensional integral equations for the equivalent electric and magnetic polarization current of periodic medium. Also the matching conditions of such structures with free space when obtaining required differential phase shift are considered. The matching is carried out by using dielectric layers. Experimental study of such DPS was carried out, the results of the study has confirmed the correctness of the choice of such structures and conditions of their matching.

Key words: terahertz frequency range, form birefringence, quasioptics, differential phase section.

В. І. Безбородов, О. С. Косяк,
Є. М. Кулешов, В. В. Ячін

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ФАЗОВІ СЕКЦІЇ
НА ОСНОВІ ПОДВІЙНОГО
ПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯ ФОРМИ
В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

При побудові поляризаційних радіовимірювальних трактів терагерцового діапазону широке застосування знахо-

дять перетворювачі поляризації, основними елементами яких є диференціальні фазові секції (ДФС). Застосування субміліметрових хвиль дозволяє здійснити дослідження в області радіоастрономії, радіоспектроскопії, біології, медицині, фізики атмосфери і т. д. У зв'язку з тим, що в терагерцовому діапазоні використовуються квазіоптичні лінії передач, виправданий перехід до оптичних принципів побудови ДФС із застосуванням діелектриків з подвійним променезаломленням. Таку властивість мають деякі кристали (сапфір, ісландський шпат, кварц і т. д.). У роботі розглянуто штучні діелектричні структури з подвійним променезаломленням форми з періодом структури, порівняним з довжиною хвилі (відомо про класичні методи розрахунку таких структур з періодом, значно меншим довжини хвилі). Розглянуто штучні діелектричні структури з подвійним променезаломленням форми з періодом структури, порівняним з довжиною хвилі. Було застосовано чисельний метод інтегральних функціоналів в частотній області для багатомодової задачі розсіювання. Цей метод базується на тривимірних інтегральних рівняннях для еквівалентного електричного і магнітного струму поляризації періодичного середовища. Також розглянуто умови узгодження таких структур із вільним простором. Узгодження здійснюється за допомогою діелектричних шарів. Було проведено експериментальне дослідження макетів таких ДФС, результат яких підтвердив правильність вибору таких структур та умов їх узгодження.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, подвійне променезаломлення форми, квазіоптика, диференціальна фазова секція.