

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

*Институт радиопрофики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: oleg.kosiak@gmail.com

**Институт радиоастрономии НАН Украины*

4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина

E-mail: yachin@rian.kharkov.ua

СОГЛАСОВАНИЕ СТРУКТУР С ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ ФОРМЫ СО СВОБОДНЫМ ПРОСТРАНСТВОМ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

При построении поляризационных радиоизмерительных трактов в качестве преобразователей поляризации, элементов непрерывных фазовращателей и сдвигателей частоты широко используются дифференциальные фазовые секции (ДФС). Применение волн терагерцевого (ТГц) диапазона позволяет осуществить исследования в области радиоастрономии, радиоспектроскопии, биологии, медицине, физике атмосферы и т. д. В связи с тем что в ТГц диапазоне волн используются квазиоптические линии передачи, оправдан переход к оптическим принципам построения ДФС с применением диэлектриков, обладающих свойством двойного лучепреломления, в частности, двулучепреломления формы. Одним из важных требований при создании ДФС является согласование их со свободным пространством. В работе рассмотрены способы согласования двулучепреломляющих структур в виде многослойного набора чередующихся диэлектрических пластин с различными диэлектрическими проницаемостями. При этом согласующий слой образован из пластин самой двулучепреломляющей структуры, выступающих над ее поверхностью. В первом случае выступающие пластины имеют поперечные пазы, во втором – пластины выполнены без пазов. Для расчета таких структур был применен численный метод интегральных функционалов в частотной области для многомодовой задачи рассеяния плоской монохроматической волны на решетке, состоящей из диэлектрических брусков без потерь. Проведено экспериментальное исследование макетов структур, которое подтвердило возможность согласования рассмотренными способами в ТГц диапазоне волн. Ил. 7. Табл. 2. Библиогр.: 6 назв.

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

В настоящее время идет процесс интенсивного освоения так называемого терагерцевого (ТГц) диапазона 0,1...10 ТГц. Для передачи электромагнитных волн этого диапазона, как правило, используются квазиоптические линии передачи. В этих линиях передачи распространение электромагнитных волн очень близко к распространению в свободном пространстве. В связи с этим очень привлекательным является переход к известным оптическим принципам построения элементов измерительных трактов.

При построении поляризационных радиоизмерительных трактов в качестве преобразователей поляризации, элементов непрерывных фазовращателей и сдвигателей частоты широко используются дифференциальные фазовые секции (ДФС). В оптике находят применение ДФС в виде пластин с двойным лучепреломлением, выполненных, например, из кристаллического кварца, сапфира, исландского шпата и других кристаллов. 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 толщиной t_1 и t_2 (рис. 1) с различными диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 [1, 2].

Одним из важных требований при создании ДФС является согласование их со свободным

пространством. От степени согласования зависит величина паразитного кросс-поляризованного колебания на выходе преобразователей поляризации, погрешность фазовращателей, наличие и величина побочных составляющих в спектре сдвигателей частоты. В работе [3] были рассмотрены ДФС на основе двулучепреломления формы для длинноволновой части ТГц диапазона и методика их согласования при помощи четвертьволнового слоя диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{\text{согл}}$ этого слоя связана с показателями преломления двулучепреломляющей структуры в направлении, ортогональном плоскости пластин (n_s) и параллельном им (n_p), выражением

$$\epsilon_{\text{согл}} = n_{\text{ср}} = \sqrt{n_p n_s}. \quad (1)$$

В случаях когда $n_{\text{ср}} \leq 2$, такое согласование можно обеспечить, используя искусственные диэлектрики. В качестве таких диэлектриков применяются пеноматериалы, однако величина их диэлектрической проницаемости сильно зависит от технологии изготовления, имеет большой разброс значений и может быть определена только экспериментальным путем. В нашей работе рассматривается возможность использования в качестве согласующего слоя искусственного диэлектрика, образованного из элементов самой двулучепреломляющей структуры.

Такой согласующий слой может быть образован пластинами одного из диэлектриков с воздушными пазами, выполненными с тем же периодом и коэффициентом заполнения $F = t_1 / (t_1 + t_2)$, какие имеет сама двулучепреломляющая структура, выступающими над поверхностью структуры на высоту h (рис. 1, а). Вследствие симметрии по осям анизотропии двулучепре-

ломляющей структуры этот слой с показателем эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{\text{согл}}$ является изотропным. В дальнейшем такое согласование будем именовать «изотропным». Поскольку n_p , n_s , $\epsilon_{\text{согл}}$ зависят от F , путем выбора этого коэффициента можно выполнить условие согласования (1).

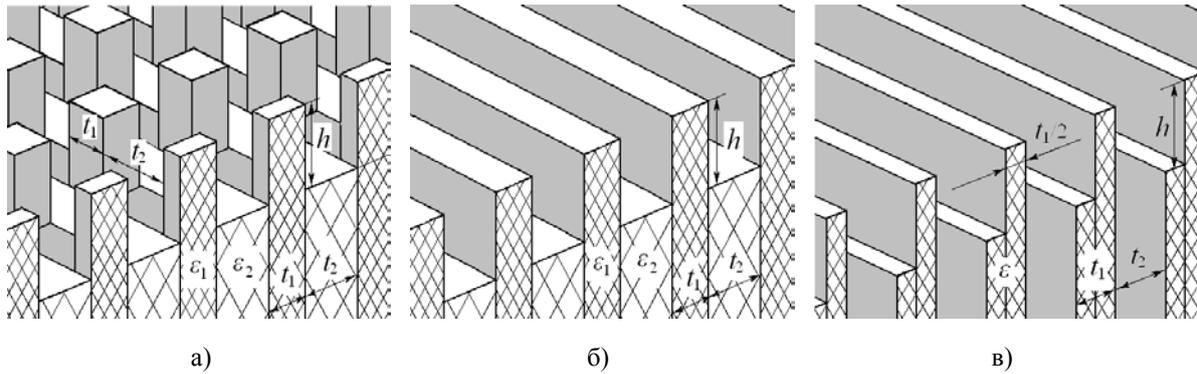


Рис. 1. Виды согласующих слоев, образованных из элементов структуры

Для нахождения зависимостей n_p , n_s , $\epsilon_{\text{согл}}$ от коэффициента заполнения F мы использовали численный метод интегральных функционалов в частотной области для многомодовой задачи рассеяния плоской монохроматической волны на решетке, состоящей из диэлектрических брусков без потерь. 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 дупериодических структурах с различными конфигурациями периода.

На рис. 2 сплошными кривыми представлены зависимости n_p , n_s , $n_{\text{ср}}$ и $\epsilon_{\text{согл}}$ от F для структуры лавсан ($\epsilon = 3$)–тефлон ($\epsilon = 2,07$), в случаях когда согласующий слой образован выступающим более плотным диэлектриком (лавсан) (рис. 2, а) и выступающим менее плотным диэлектриком (тефлон) (рис. 2, б). Расчет произведен при $\kappa = (t_1 + t_2) / \lambda_0 = 0,5$, удовлетворяющем условию отсутствия высших дифракционных гармоник:

$$(t_1 + t_2) \leq \lambda / n_p, \quad (2)$$

где λ – длина волны (λ_0 – длина волны на центральной частоте).

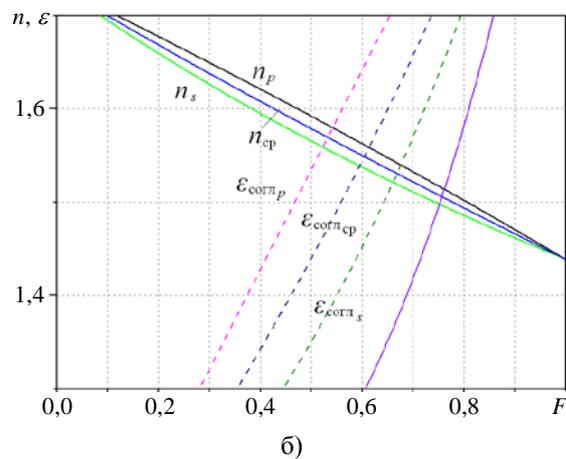
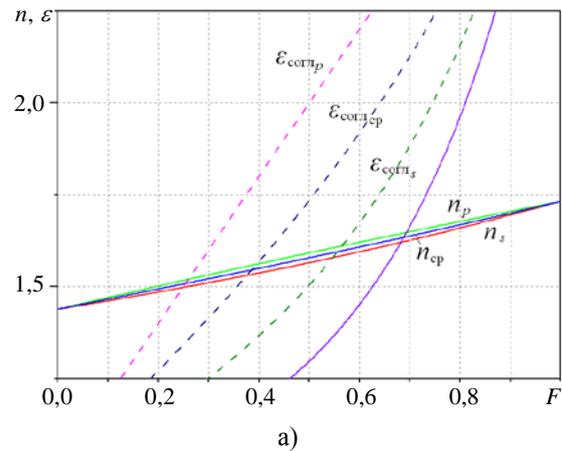


Рис. 2. Методика нахождения параметров согласованной двулучепреломляющей структуры лавсан–тефлон

Искомая величина коэффициента заполнения F соответствует точке пересечения зависимостей $\varepsilon_{\text{согл}}$ и $n_{\text{ср}}$ от F . Полученная величина $\varepsilon_{\text{согл}}$ позволяет сразу вычислить высоту согласующего слоя h

$$h = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\varepsilon_{\text{согл}}}}. \quad (3)$$

В табл. 1 представлены расчетные параметры F и h согласованных полубесконечных структур лавсан–тефлон и полистирол($\varepsilon=2,5$)–воздух, при κ , удовлетворяющем условию (2). Там же приведены коэффициенты отражения R_{0s} , R_{0p} по осям анизотропии для несогласованных структур, коэффициент отражения R для согласованных структур на центральной частоте f_0 и полоса частот Δf согласования на уровне не хуже -20 дБ.

Таблица 1

Параметры структур при «изотропном» согласовании

Двулучепреломляющая структура			F	$h_0 = h / \lambda_0$	R_{0s}	R_{0p}	R	$\Delta f / f_0, \%$
Лавсан–тефлон	$\kappa = 0,5$	$\varepsilon_1 = 3$ $\varepsilon_2 = 2,07$	0,694	0,195	0,238	0,245	0,005	52
		$\varepsilon_1 = 2,07$ $\varepsilon_2 = 3$	0,76	0,204	0,198	0,204	0,005	76
Полистирол–воздух	$\kappa = 0,6$	$\varepsilon_1 = 2,5$ $\varepsilon_2 = 1$	0,526	0,222	0,094	0,144	0,025	94

На рис. 3 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения согласованных, таким образом, полубесконечных двулучепреломляющих структур, где f/f_0 – относительная частота.

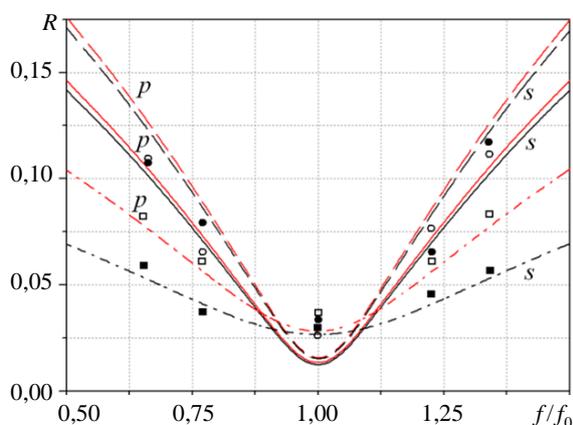


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов отражения от полубесконечных структур при «изотропном согласовании»: сплошные кривые – лавсан–тефлон при выступающем тефлоне (○, ● – соответственно экспериментальные значения R_p и R_s); пунктирные кривые – лавсан–тефлон при выступающем лавсане и штрих-пунктирные – полистирол–воздух (□ – R_p , ■ – R_s)

Данный метод согласования довольно легко реализуется в длинноволновой части ТГц диапазона. С продвижением в коротковолновую часть ТГц диапазона из-за условия (2) данный метод становится малопригодным вследствие значительных технологических трудностей выполнения пазов в диэлектрических пластинах.

Рассмотрим эффективность согласования двулучепреломляющей структуры с выступаю-

щим за ее поверхность одним из диэлектриков без поперечных пазов (см. рис. 1, б). Поскольку выступающий слой представляет собой двулучепреломляющую структуру диэлектрик–воздух, условие согласования в этом случае приобретает вид

$$\varepsilon_{\text{соглср}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{соглр}} \varepsilon_{\text{согls}}} = \sqrt{n_p n_s}. \quad (4)$$

В дальнейшем такой способ согласования будем именовать «анизотропным».

Для нахождения зависимостей $\varepsilon_{\text{соглр}}$, $\varepsilon_{\text{согls}}$ и $\varepsilon_{\text{соглср}}$ от коэффициента заполнения F был применен тот же метод интегральных функционалов. Эти зависимости для структуры лавсан–тефлон приведены на рис. 2 пунктирными кривыми. Отличие в нахождении искомой величины F в том, что она соответствует в этом случае пересечению зависимостей $\varepsilon_{\text{соглср}}$ и $n_{\text{ср}}$, а

$$\text{высота } h = \lambda_0 / 4\sqrt{\varepsilon_{\text{соглср}}}.$$

Когда двулучепреломляющая структура является набором диэлектрических пластин с воздушным зазором, вышеприведенная методика согласования неприемлема. В этом случае такое согласование можно осуществить только уменьшением толщины пластины согласующего слоя. Проще всего это можно сделать путем выполнения диэлектрической пластины из двух пластин одинаковой толщины, из которых только одна выступает за поверхность двулучепреломляющей структуры (см. рис. 1, в), т. е. коэффициент заполнения в согласующем слое вдвое меньше коэффициента заполнения двулучепреломляю-

шей структуры. Зависимости $\varepsilon_{\text{согл ср}}$ и $n_{\text{ср}}$ от коэффициента заполнения F не имеют точки пересечения, но при невысоком значении диэлектрической проницаемости пластин ($\varepsilon < 3$) близки на всем интервале изменения F . На рис. 4 приведены данные зависимости для структуры полистирол–воздух при $\kappa = 0,6$.

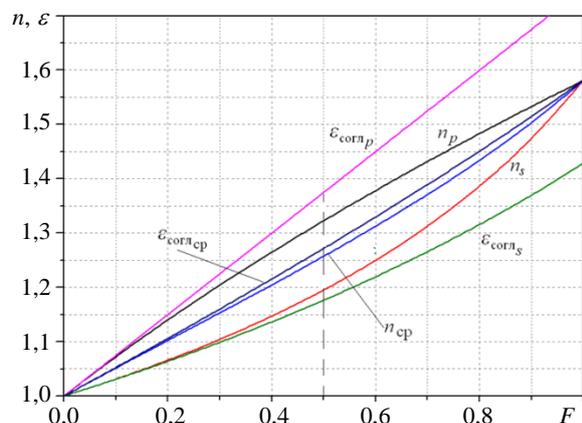


Рис. 4. Методика нахождения параметров двулучепреломляющей структуры полистирол–воздух при анизотропном согласовании

Расчетные параметры согласуемых структур лавсан–тефлон и полистирол–воздух, коэффициенты отражения R_{0s} , R_{0p} до согласования и коэффициент отражения R на центральной частоте после согласования, а также полоса частот согласования Δf на уровне не хуже -20 дБ приведены в табл. 2.

Частотные зависимости коэффициентов отражения по осям анизотропии для перечисленных структур приведены на рис. 5: сплошные

кривые – лавсан–тефлон при выступающем тефлоне; пунктирные кривые – лавсан–тефлон при выступающем лавсане и штрих-пунктирные – полистирол–воздух.

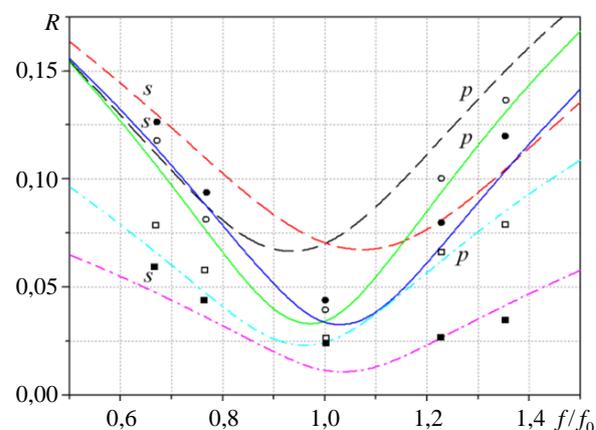


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов отражения от полубесконечных структур при «анизотропном согласовании»: сплошные кривые – лавсан–тефлон при выступающем тефлоне (○, ● – соответственно экспериментальные значения R_p и R_s); пунктирные кривые – лавсан–тефлон при выступающем лавсане (□ – R_p , ■ – R_s) и штрих-пунктирные – полистирол–воздух

Заметим, что данный способ согласования эффективен не только для двулучепреломляющих структур со средним показателем преломления $n_{\text{ср}} \leq 2$. В табл. 2 приведены параметры, а на рис. 6 частотные зависимости коэффициентов отражения для структуры слюда($\varepsilon = 6,9$)–лавсан. Для сравнения на рис. 6 пунктирными кривыми приведены частотные зависимости коэффициентов отражения при согласовании структуры слюда–лавсан с помощью четвертьволнового слоя тефлона.

Таблица 2

Параметры структур при «анизотропном» согласовании

Двулучепреломляющая структура			F	$h_0 = h / \lambda_0$	R_{0s}	R_{0p}	R	$\Delta f / f_0, \%$
Слюда–лавсан	$\kappa = 0,2$	$\varepsilon_1 = 6,9$ $\varepsilon_2 = 3$	0,317	0,178	0,31	0,35	0,07	35
		$\varepsilon_1 = 3$ $\varepsilon_2 = 6,9$	0,648	0,176	0,32	0,35	0,03	53
Лавсан–тефлон	$\kappa = 0,5$	$\varepsilon_1 = 3$ $\varepsilon_2 = 2,07$	0,387	0,201	0,21	0,22	0,09	32
		$\varepsilon_1 = 2,7$ $\varepsilon_2 = 3$	0,605	0,201	0,21	0,22	0,03	50
Полистирол–воздух	$\kappa = 0,6$	$\varepsilon_1 = 2,5$ $\varepsilon_2 = 1$	0,5	0,223	0,09	0,14	0,02	>90

Анализ частотных зависимостей коэффициентов отражения показывает возможность согласования двулучепреломляющих структур приведенными выше способами.

Лучшее согласование достигается при использовании пластин с поперечными пазами. Данное согласование является полным аналогом согласования с помощью четвертьволнового слоя

изотропного диэлектрика с соответствующим показателем преломления. При этом уровень и полоса частот согласования практически не зависят от того, какой из диэлектриков, образующих двулучепреломляющую структуру, формирует согласующий слой.

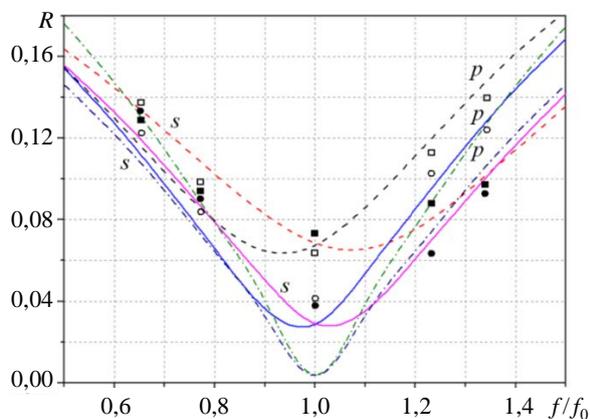


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициентов отражения от полубесконечной структуры слюда-лавсан при «анизотропном согласовании»: сплошные кривые – при выступающем лавсане (○, ● – соответственно экспериментальные значения R_p и R_s); пунктирные кривые – при выступающей слюде (□ – R_p , ■ – R_s) и штрих-пунктирные – при согласовании четвертьволновым слоем тефлона

При согласовании с помощью пластин без пазов частотная зависимость становится асимметричной относительно центральной частоты f_0 , вследствие чего сужается ширина полосы частот, в которой коэффициент отражения не превышает некий уровень по обеим осям анизотропии. Также заметим, что из-за влияния эффекта двулучепреломления согласующего слоя дифференциальный сдвиг фаз на выходе ДФС увеличивается на величину

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda} \left(\sqrt{\varepsilon_{\text{согл } p}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{согл } s}} \right).$$

Уровень согласования становится зависящим от того, какой из диэлектриков образует согласующий слой. Лучшее согласование, практически идентичное, а в случае, например, структуры полистирол-воздух даже лучше уровня «изотропного» согласования, имеет место, когда согласующий слой выполнен из менее плотного диэлектрика. При этом немаловажное значение имеет тот факт, что коэффициент заполнения двулучепреломляющей структуры лежит в интервале $F = 0,5 \dots 0,7$, где реализуется максимальный показатель двулучепреломления $\Delta n = n_p - n_s$ [3].

Главным преимуществом «анизотропного» способа согласования в сравнении с «изотропным» является возможность его использования в более коротковолновой части ТГц диапазона.

Экспериментальная проверка возможности согласования описанными выше способами проведена в частотном диапазоне 0,11...0,225 ТГц. «Изотропное» согласование исследовалось на структурах полистирол-воздух и лавсан-тефлон при выступании тефлона. «Анизотропное» согласование – на структурах лавсан-тефлон и слюда-лавсан. Выбор этих материалов и диапазона был сделан исходя из технологической целесообразности изготовления как самой структуры, так и согласующего слоя. Слюда, лавсан, полистирол и тефлон изготавливаются в виде пленок (пластинок) различной толщины, что позволяет с большой точностью обеспечить требуемый коэффициент заполнения при выполнении условия одноמודовости (2).

Схема квазиоптической измерительной установки на базе полого диэлектрического лучевода диаметром 20 мм [6] для измерения малых коэффициентов отражения приведена на рис. 7.

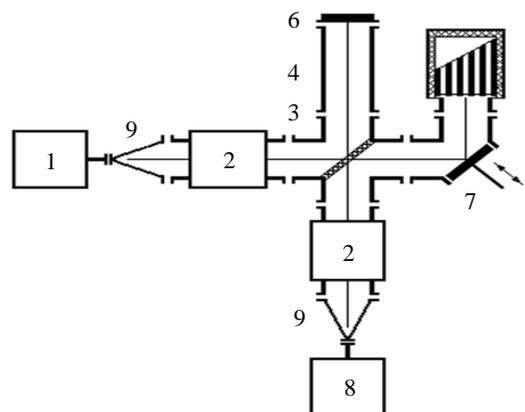


Рис. 7. Схема измерительной установки

В качестве источника ТГц излучения 1 использовались анализаторы СВЧ-цепей *ELMIKAG4403E* 0,11...0,172 ТГц и *ELMIKAG4402E* 0,172...0,225 ТГц в режиме работы на фиксированных частотах. Источники излучения подключались к квазиоптическому тракту посредством волноводно-лучеводного перехода 9.

Коэффициент отражения определялся путем измерения отношения максимума и минимума интерференционной картины на выходе квазиоптического интерферометра Майкельсона 3, получаемой путем регулировки фазовращателя 7, включенного перед исследуемой структурой 5 в одно из плеч интерферометра. В смежное плечо интерферометра помещен неподвижный плоский отражатель 6, перед которым для уравнивания ослабления в плечах интерферометра с целью получения острого компенсационного минимума сигнала в квадратичном детекторе 8 включался отрезок полого диэлектрического лучевода 4.

На входе и выходе интерферометра Майкельсона 3 включались развязывающие квазиоптические аттенуаторы 2. С целью уменьшения влияния отражения сигнала от второй границы структуры на результаты измерения она выполнялась под углом $\sim 60^\circ$ к оси лучевода, а сама структура помещалась в неотражающую мини-камеру.

При измерении коэффициентов отражения R_p, R_s двулучепреломляющая структура устанавливается в лучеводе соответственно параллельно и ортогонально плоскости поляризации падающей волны. При этом коэффициент отражения R вычисляется по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{A_{\max} / A_{\min} - 1}{A_{\max} / A_{\min} + 1}}, \quad (6)$$

где A_{\min} и A_{\max} соответственно минимальное и максимальное показания на выходе детектора 8.

Результаты измерения нанесены на соответствующие расчетные кривые (см. рис. 3, 5, 6) точками. Полученные результаты достаточно хорошо совпадают с расчетом.

Выводы. Таким образом, впервые в ТГц диапазоне частот разработаны способы согласования структур, обладающих свойством двулучепреломления формы при помощи элементов самих структур. Эти способы согласования целесообразно применять в случаях, когда для создания четвертьволнового слоя требуются искусственные материалы.

В первом способе согласование осуществляется посредством выступления пластин одного из диэлектриков с поперечными пазами за поверхность структуры («изотропное» согласование). Во втором – посредством выступления пластин без пазов («анизотропное» согласование).

Первый способ является аналогом согласования структуры при помощи четвертьволнового просветляющего слоя изотропного диэлектрика. При втором способе слой является анизотропным и поэтому влияет на величину дифференциального сдвига фаз, создаваемого структурой.

При выступающем над поверхностью двулучепреломляющей структуры менее плотном диэлектрике «анизотропный» способ позволяет получить уровень согласования, близкий к уровню «изотропного» согласования. При этом реализуется и максимальный показатель двулучепреломления.

Основным преимуществом «анизотропного» способа согласования является возможность использования его в коротковолновой части 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. Kirschbaum, S. Chen // IRE Trans. On Microwave and Techniques. – 1957. – МТТ-5, N 3. – P. 199–203.*

3. *Дифференциальные фазовые секции на основе эффекта двулучепреломления формы в терагерцевом диапазоне волн / В. И. Безбородов, О. С. Косяк, Е. М. Кулешов, В. В. Ячин // Радиофизика и электрон. – 2014. – 5(19), № 3. – С. 92–97.*

4. *Yachin V. Method of integral functionals for electromagnetic wave scattering from a double-periodic magnetodielectric layers / V. Yachin, K. Yasumoto // J. Opt. Soc. Am. A. – 2007. – 24, N 11. – P. 3606–3618.*

5. *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.*

6. *Кулешов Е. М. Измерения в субмм диапазоне волн / Е. М. Кулешов // Электроника и радиофизика мм и субмм волн. – К.: Наук. думка, 1986. – Гл. 8. – С. 140–157.*

Рукопись поступила 24.03.2015.

V. I. Bezborodov, O. S. Kosiak,
Ye. M. Kuleshov, V. V. Yachin

MATCHING STRUCTURES WITH FORM BIREFRINGENCE WITH FREE SPACE IN THZ RANGE

When constructing polarization radio measuring paths operating in the THz frequency range (0.1...10 THz) the differential phase sections (DPS) are widely used. The use of terahertz waves (THz) allows research in radio astronomy, radio spectroscopy, biology, medicine, physics of the atmosphere, etc. Due to the fact that in a terahertz wave range quasi-optical transmission lines are used the transfer to the optical principles of construction DPS using dielectrics having birefringence property, in particular, form birefringence seems to be very attractive. One of the important requirements when creating the DPS is their matching with free space. The paper represents the ways of matching structures with form birefringence in the form of a multilayer stack of alternating dielectric plates with different dielectric constants. Such an antireflection layer may be formed when one of the plates is projected over the surface of the birefringent dielectric structure. In the first case projecting plates have transverse grooves. In the second case plates are formed without grooves. For the calculation of such structures we used a numerical method of integral functionals in the frequency domain for full wave dispersion problem of plane monochromatic wave scattering from a lattice consisting of dielectric bars without loss. An experimental study of models of structures, which confirmed the possibility of matching with the methods discussed in the THz range was made.

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

V. I. Bezborodov, O. S. Kosiak,
E. M. Kuleshov, V. V. Yachin

УЗГОДЖЕННЯ СТРУКТУР З ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЕННЯМ ФОРМИ З ВІЛЬНИМ ПРОСТОРОМ У ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

При побудові поляризаційних радіовимірювальних трактів як перетворювачів поляризації, елементів безперервних фазообертачів і зрушувачів частоти широко використовуються диференційні фазові секції (ДФС). Застосування

хвиль терагерцового (ТГц) діапазону дозволяє здійснити дослідження в області радіоастрономії, радіоспектроскопії, біології, медицини, фізики атмосфери та ін. У зв'язку з тим що в ТГц діапазоні хвиль використовуються квазіоптичні лінії передачі, виправданий перехід до оптичних принципів побудови ДФС із застосуванням діелектриків, які мають властивість подвійного променезаломлення, зокрема, двоприменезаломлення форми. Однією з важливих вимог при створенні ДФС є узгодження їх з вільним простором. У роботі розглянуто способи узгодження двоприменезаломлених структур у вигляді багатшарового набору переміжних діелектричних пластин з різними діелектричними проникностями. При цьому узгоджувальний шар утворений з пластин самої двопримене-

заломленої структури, які виступають над її поверхнею. У першому випадку виступаючі пластини мають поперечні пази, у другому – пластини виконано без пазів. Для розрахунку таких структур був застосований числовий метод інтегральних функціоналів у частотній області для багатшарової задачі розсіяння плоскої монохроматичної хвилі на решітці, що складається з діелектричних брусів без втрат. Проведено експериментальне дослідження макетів структур, яке підтвердило можливість узгодження розглянутими способами в ТГц діапазоні хвиль.

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