

УДК 535.515:621.3.072.7

О. С. КОСЯК, В. И. БЕЗБОРОДОВ, Е. М. КУЛЕШОВ,
П. К. НЕСТЕРОВPACS numbers: 42.25.Lc,
42.25.Bs, 42.70.MrИнститут радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085, Украина
E-mail: oleg.kosiak@gmail.com

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ И ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ФАЗОВЫЕ СЕКЦИИ В ТЕРАГЕРЦЕВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Предмет и цель работы: Исследуются квазиоптические перестраиваемые и широкополосные дифференциальные фазовые секции (ДФС), состоящие из нескольких двулучепреломляющих элементов (ДЭ) на основе эффекта двулучепреломления формы.

Методы и методология: При помощи метода поляризационных матриц рассеяния рассматривается влияние взаимного разворота осей анизотропии нескольких ДЭ на величину сдвига фаз и положение плоскости анизотропии результирующей ДФС.

Результаты: Показано, что перестраиваемые в широком диапазоне частот ДФС могут быть реализованы в случае четвертьволновой ДФС из двух, а в случае полуволновой – из трех одинаковых неперестраиваемых ДЭ. В результате анализа сделан вывод о возможности создания широкополосных четвертьволновых и полуволновых ДФС.

Заключение: Экспериментальное исследование подтвердило возможность построения перестраиваемых и широкополосных ДФС. На их основе возможно создание перестраиваемых и широкополосных преобразователей поляризации, вращателей плоскости поляризации, поляризационных фазовращателей и сдвигателей частоты в терагерцевом диапазоне частот.

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

1. Введение

При построении квазиоптических поляризационных радиоизмерительных трактов терагерцевого диапазона ($0.1 \div 10$ ТГц) широко используются дифференциальные фазовые секции (ДФС) в виде двулучепреломляющего элемента (ДЭ), помещенного в квазиоптический волноведущий тракт. Такие элементы могут быть выполнены как из природных кристаллических материалов (кристаллический кварц, сапфир и пр.), так и из искусственных диэлектриков, обладающих так называемым двулучепреломлением формы. Классическим примером такой структуры является многослойный набор чередующихся диэлектрических пластин с различными диэлектрическими проницаемостями [1]. Параметры ДЭ на основе двулучепреломления формы определяются геометрией и диэлектрическими проницаемостями используемых материалов. На их основе были разработаны ДФС в диапазоне $0.1 \div 1$ ТГц [2]. При всей высокой эффективности таких секций они обладают существенным недостатком – секции выполняются с прецизионной точностью для работы на конкретной частоте и

не могут быть перестроены в процессе работы. При создании перестраиваемых фазовых секции в этом диапазоне может быть использован применяемый в оптике принцип, заключающийся в последовательном включении нескольких ДЭ, оптические оси которых развернуты на некоторый угол. В терагерцевом диапазоне на основе пластин из кристаллического кварца были разработаны широкополосные фазовые преобразователи [3]. Как правило, анализ таких структур осуществлялся с помощью сферы Пуанкаре [4–6] или матричного метода Мюллера [7, 8].

В настоящей работе предлагаются перестраиваемые четвертьволновые и полуволновые ДФС на основе структур, обладающих двулучепреломлением формы, для работы в длинноволновой части терагерцевого диапазона ($0.1 \div 1$ ТГц). При этом их анализ осуществляется с помощью метода поляризационных матриц рассеяния (ПМР) [9]. Целью анализа является определение взаимного расположения осей анизотропии отдельных ДЭ для получения требуемого результирующего дифференциального сдвига фаз и положения результирующих эффективных осей анизотропии всего устройства. При анализе будем стремиться к максимальной простоте построения таких ДФС,

что подразумевает использование минимального количества элементов с минимальным количеством регулировок.

2. Теоретическое исследование возможности создания перестраиваемых и широкополосных ДФС

Рассмотрим возможность реализации четвертьволновой ДФС, состоящей из двух развернутых друг относительно друга на некоторый угол φ ДЭ, создающих на данной частоте дифференциальные сдвиги фаз соответственно Δ_1 и Δ_2 . Схематическое изображение исследуемой структуры приведено на рис. 1, где составляющие ДЭ условно изображены в виде плоскостей анизотропии для волны, испытывающей замедление, а эффективная плоскость анизотропии эквивалентной ДФС очерчена пунктиром.

Будем полагать, что ДЭ не обладают дихроизмом (отличием затухания по осям анизотропии) и полностью согласованы с квазиоптическим трактом. В этом случае ПМР каждого элемента в собственных поляризационных базисах $[x_i, y_i]$, т. е. при совпадении ортов базисов с осями анизотропии ДЭ, имеет вид 2×2 -матрицы передачи Джонса,

$$\hat{S}_{0i} = \begin{pmatrix} e^{i\Delta_i} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а ПМР эффективной ДФС \hat{S} представляет собой произведение этих матриц при согласовании их поляризационных базисов.

Вид ПМР устройства зависит от выбора поляризационных базисов. При анализе четвертьволновых ДФС, основная функция которых заключается в преобразовании линейно поляризованной волны в круговую и наоборот, целесообразно применять линейный поляризационный базис для линейно поляризованной волны и круговой базис для кругополяризованной волны. Выберем в качестве поляризационного базиса входного сигнала собственный линейный поляризационный базис эффективной ДФС $[x_{эфф}, y_{эфф}]$, который повернут относительно собственного поляризационного

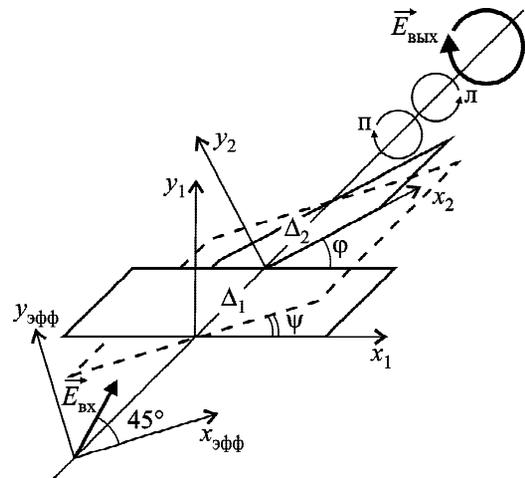


Рис. 1. Схема перестраиваемой четвертьволновой ДФС

базиса первой пластины $[x_1, y_1]$ на угол ψ . Поляризационный базис выходного сигнала выберем круговым $[\hat{e}_n, \hat{e}_l]$.

В этом случае сигнал на выходе эффективной ДФС имеет вид:

$$\vec{E}_{\text{вых}} = \hat{S} \cdot \vec{E}_{\text{вх}} = \hat{G} \cdot \hat{S}_{0_2} \cdot \hat{\phi} \cdot \hat{S}_{0_1} \cdot \hat{\psi} \cdot \vec{E}_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $\hat{\psi} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix}$, $\hat{\phi} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$ – матрицы поворота линейных поляризационных базисов соответственно на углы ψ и $-\varphi$, а $\hat{G} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ 1 & -i \end{pmatrix}$ – матрица преобразования линейного базиса в круговой.

Обеспечение заданного дифференциального сдвига фаз при изготовлении ДЭ на основе двулучепреломления формы сопряжено с определенными трудностями из-за влияния трудно учитываемых краевых эффектов. В то же время изготовление одинаковых ДЭ не вызывает затруднений, поэтому будем полагать $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$. Тогда при подаче на вход линейно поляризованного колебания $\vec{E}_{\text{вх}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ под углом 45° в поляризационном базисе $[x_{эфф}, y_{эфф}]$ сигнал на выходе в круговом поляризационном базисе $[\hat{e}_n, \hat{e}_l]$ имеет вид:

$$\vec{E}_{\text{вых}} = \begin{pmatrix} E_{\text{пр}} \\ E_{\text{лев}} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{i\Delta} (\cos \psi + \sin \psi) (e^{i\Delta} \cos \varphi + i \sin \varphi) + (\cos \psi - \sin \psi) (e^{i\Delta} \sin \varphi + i \cos \varphi) \\ e^{i\Delta} (\cos \psi + \sin \psi) (e^{i\Delta} \cos \varphi - i \sin \varphi) - (\cos \psi - \sin \psi) (e^{i\Delta} \sin \varphi + i \cos \varphi) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Если полученная секция является полным эквивалентом четвертьволновой ДФС, то на выходе должна присутствовать волна только одной круговой поляризации, предположим – правой. Составляющая $E_{\text{лев}}$ в таком случае является паразитной. Тогда, решая уравнение $|E_{\text{лев}}| = 0$, получаем, что для реализации четвертьволновой ДФС относительный угол разворота осей анизотропии ДЭ должен составлять

$$\varphi = \arctg \sqrt{|\cos 2\Delta|}, \quad (3)$$

а плоскость анизотропии эффективной ДФС повернута относительно плоскости анизотропии первой пластины на угол

$$\psi = -\arctg \left(1 - \frac{2 \cos \Delta \sqrt{|\cos 2\Delta|}}{\cos 2\Delta + (\cos \Delta + \sin \Delta) \sqrt{|\cos 2\Delta|}} \right). \quad (4)$$

Зависимости углов φ и ψ от дифференциального сдвига фаз Δ для перестраиваемой четвертьволновой ДФС приведены на рис. 2 сплошными линиями.

Реализация перестраиваемой четвертьволновой ДФС возможна в случае, если дифференциальный сдвиг фаз, создаваемый каждым из ДЭ,

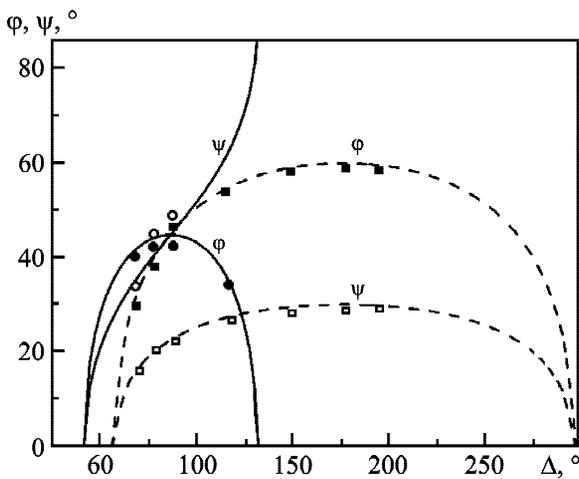


Рис. 2. Зависимости углов φ и ψ от дифференциального сдвига фаз ДЭ Δ для четвертьволновых (сплошные кривые) и полуволновых (штриховые кривые) перестраиваемых ДФС, состоящих из одинаковых ДЭ. Черными и белыми кружками отмечены соответственно экспериментальные значения φ и ψ , измеренные для четвертьволновой ДФС, а черными и белыми квадратиками – экспериментальные значения φ и ψ для полуволновой ДФС

составляет от 45° до 135° . Если зависимость дифференциального сдвига фаз Δ от частоты f полагается линейной, осуществить такую ДФС можно в полосе частот с коэффициентом перекрытия $f_{\text{max}}/f_{\text{min}} = 3$.

Важным параметром ДФС является ее широкополосность при фиксированной настройке. Оценка широкополосности может быть осуществлена по зависимости амплитуды паразитной составляющей сигнала $|E_{\text{пар}}|$ на выходе ДФС от частоты. В рассматриваемом случае $|E_{\text{пар}}| = |E_{\text{лев}}|$ (см. формулу (2)). На рис. 3 приведены расчетные частотные зависимости амплитуды паразитного кругополяризованного колебания $|E_{\text{пар}}|$ на выходе перестраиваемой четвертьволновой ДФС при подаче на вход линейно поляризованной волны, плоскость поляризации которой ориентирована под углом 45° в поляризационном базисе $[x_{\text{эфф}}, y_{\text{эфф}}]$. Зависимости, обозначенные цифрами 1–4, рассчитаны для ряда значений дифференциального сдвига фаз Δ каждого ДЭ на центральной частоте f_0 при соответствующих углах φ и ψ (см. формулы (3), (4)).

Анализируя приведенные зависимости, можно сделать следующие выводы. При значениях дифференциального сдвига фаз ДЭ на центральной частоте 45° и 90° широкополосность перестраиваемого преобразователя поляризации такая же, как и у обычной (одиночной) четвертьволновой

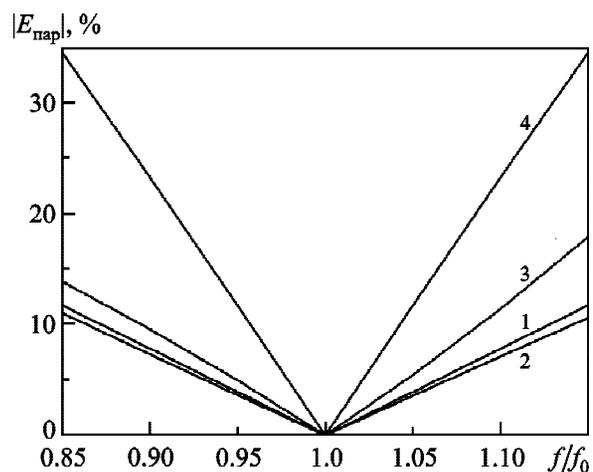


Рис. 3. Частотная зависимость амплитуды паразитной кругополяризованной составляющей на выходе перестраиваемой четвертьволновой ДФС при различных значениях дифференциального сдвига фаз каждого ДЭ на центральной частоте: $\Delta = \pi/4, \pi/2$ – кривая 1; $\Delta = 3\pi/8$ – кривая 2; $\Delta = 5\pi/8$ – кривая 3; $\Delta = 3\pi/4$ – кривая 4

ДФС. В интервале $45^\circ < \Delta < 90^\circ$ имеет место незначительное увеличение широкополосности. При секциях большего размера наблюдается сужение полосы рабочих частот, что связано с увеличением общей длины устройства.

Перейдем к рассмотрению возможности реализации перестраиваемой полуволновой ДФС, состоящей из нескольких элементов. Для нахождения параметров полуволновой ДФС можно воспользоваться ее свойствами. В поле кругополяризованной волны полуволновая ДФС преобразует поляризацию одного вида, например правую круговую, в ортогональную (левую круговую). В поле линейно поляризованной волны полуволновая ДФС является вращателем плоскости поляризации.

Реализовать перестраиваемую полуволновую ДФС из двух одинаковых ДЭ невозможно. Объяснить это можно, например, следующим образом. При преобразовании падающей кругополяризованной волны одного вида в кругополяризованную волну ортогонального вида в средней части ДФС поляризация линейная. Следовательно, каждый из двух одинаковых ДЭ, образующих полуволновую ДФС, является преобразователем линейной поляризации в круговую или наоборот. Это соответствует единственному случаю реализации полуволновой ДФС, когда дифференциальный сдвиг фаз каждого ДЭ составляет 90° , а плоскости анизотропии обоих ДЭ ориентированы параллельно.

Рассмотрим возможность реализации перестраиваемой полуволновой ДФС из трех одинаковых элементов ($\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta$). Для минимизации количества регулировок вращается только средний ДЭ. При этом плоскости анизотропии крайних ДЭ параллельны. Рассмотрение такой структуры в поле кругополяризованной волны требует анализа амплитуды и фазы выходного сигнала. В поле линейно поляризованной волны требуется анализ лишь амплитуды. Проведем анализ в линейных поляризационных базисах (см. рис. 4).

Для нахождения угла разворота среднего ДЭ φ и ориентации плоскости анизотропии эффективной ДФС ψ воспользуемся свойством полуволновой ДФС поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованной волны на удвоенный угол разворота плоскости поляризации падающей волны относительно ее плоскости ани-

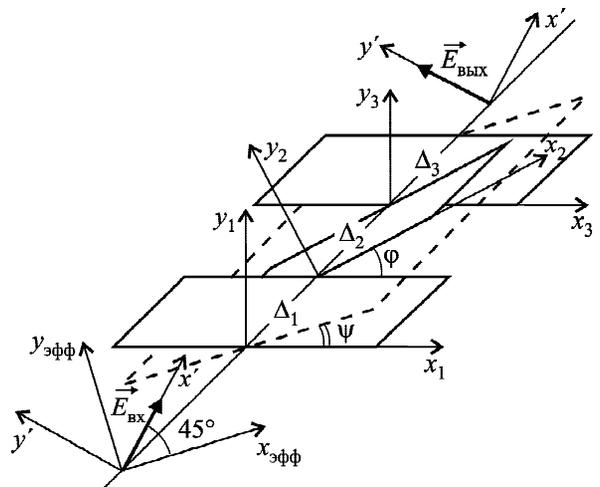


Рис. 4. Схема перестраиваемой полуволновой ДФС

зотропии. Частным случаем является поворот плоскости поляризации на 90° при ориентации плоскости поляризации падающей волны под углом 45° . Для упрощения формы записи входного и выходного сигналов в этом случае целесообразно ввести дополнительный поляризационный базис $[x', y']$, который развернут относительно собственного поляризационного базиса $[x_{эфф}, y_{эфф}]$ эффективной ДФС на угол 45° . Сигнал на выходе системы из трех одинаковых ДЭ, крайние из которых параллельны, а средний повернут на угол φ в едином линейном базисе $[x', y']$ имеет вид:

$$\vec{E}_{\text{вых}} = \hat{S} \cdot \vec{E}_{\text{вх}} = \hat{\theta}^* \cdot \hat{S}_0 \cdot \hat{\phi}^* \cdot \hat{S}_0 \cdot \hat{\phi} \cdot \hat{S}_0 \cdot \hat{\theta} \cdot \vec{E}_{\text{вх}},$$

где $\hat{\theta} = \begin{pmatrix} \cos(\psi + 45) & \sin(\psi + 45) \\ -\sin(\psi + 45) & \cos(\psi + 45) \end{pmatrix}$ – матрица поворота линейного поляризационного базиса на угол $\psi + 45^\circ$, $\hat{\theta}^*$ и $\hat{\phi}^*$ – эрмитово-сопряженные матрицы соответственно к матрицам $\hat{\theta}$ и $\hat{\phi}$. Если полученная секция является полным эквивалентом обычной полуволновой ДФС, то при подаче на вход $\vec{E}_{\text{вх}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ сигнал на выходе имеет вид $\vec{E}_{\text{вых}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Решая уравнение

$$\begin{aligned} |E_{\text{пар}}| &= |E_{\text{вых}}| = \\ &= e^{j\Delta} \left[e^{j\Delta} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \psi\right) \cos\varphi + \sin\left(\frac{\pi}{4} + \psi\right) \sin\varphi \right]^2 + \end{aligned}$$

$$+ \left[e^{j\Delta} \cos\left(\frac{\pi}{4} + \psi\right) \sin\varphi - \sin\left(\frac{\pi}{4} + \psi\right) \cos\varphi \right]^2 = 0 \quad (5)$$

получаем, что для реализации полуволновой ДФС угол разворота оси анизотропии среднего ДЭ относительно плоскости анизотропии крайних ДЭ должен составлять

$$\varphi = \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{|\cos(3\Delta/2)|}{\cos(\Delta/2)}}. \quad (6)$$

При этом плоскость анизотропии эффективной ДФС составляет с той же плоскостью угол

$$\psi = \varphi/2. \quad (7)$$

Зависимости углов φ и ψ от дифференциального сдвига фаз Δ приведены на рис. 2 штриховыми линиями. Реализация полуволновой ДФС возможна в случае, если дифференциальный сдвиг фаз каждого из элементов составляет от 60° до 300° или в полосе частот с коэффициентом перекрытия $f_{\max}/f_{\min} = 5$. Из рис. 2 следует также, что в интервале значений дифференциального сдвига фаз ДЭ от 60° до 135° четвертьволновая и полуволновая секции могут быть реализованы из одних и тех же ДЭ, что весьма удобно при их изготовлении.

Широкополосность перестраиваемой полуволновой ДФС при фиксированной настройке будем оценивать по зависимости амплитуды паразитной линейной кросс-поляризованной волны $|E_{\text{пар}}|$ (см. выражение (5)) на выходе от относительной частоты f/f_0 . Расчетные зависимости $|E_{\text{пар}}|$ для нескольких значений дифференциального сдвига фаз каждого ДЭ на центральной частоте f_0 и соответствующих им углов φ и ψ (формулы (6) и (7)) представлены на рис. 5. При $\Delta = 60^\circ$ (кривая 1) зависимость совпадает с зависимостью для обычной полуволновой ДФС. При $\Delta = 230^\circ$ (кривая 4) общая полоса рабочих частот примерно равна полосе рабочих частот обычной полуволновой ДФС, но становится ассиметричной относительно f_0 . Полоса рабочих частот полуволновой перестраиваемой ДФС в интервале значений дифференциального сдвига фаз на каждом элементе от 60° до $\approx 230^\circ$ больше, чем ширина полосы рабочих частот обычной полуволновой

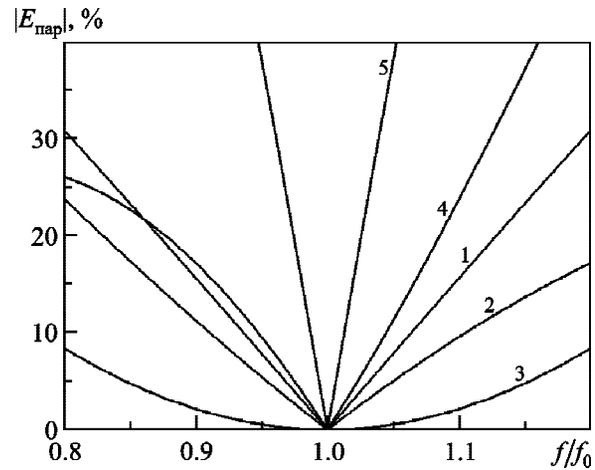


Рис. 5. Частотная зависимость ортогональной паразитной составляющей на выходе перестраиваемой полуволновой ДФС в поле линейно поляризованной волны при различных значениях дифференциального сдвига фаз каждого ДЭ на центральной частоте: $\Delta = 60^\circ$ – кривая 1; $\Delta = 120^\circ$ – кривая 2; $\Delta = 180^\circ$ – кривая 3; $\Delta = 230^\circ$ – кривая 4; $\Delta = 300^\circ$ – кривая 5

секции. Максимальная рабочая полоса частот, значительно превышающая рабочую полосу частот обычной полуволновой ДФС, достигается при $\Delta = 180^\circ$ и $\varphi = 60^\circ$ (кривая 3). Это связано с малой крутизной зависимости угла разворота средней секции φ и положения эффективной плоскости анизотропии ψ от Δ (рис. 2), что эквивалентно зависимости от частоты. Таким образом, данная ДФС является широкополосной по сравнению с одиночной ДФС.

Поскольку половина полуволновой ДФС является четвертьволновой ДФС, логично предположить, что комбинация полуволнового и четвертьволнового ДЭ, развернутых на угол $\varphi = 60^\circ$, образует также широкополосный преобразователь линейной поляризации в круговую (четвертьволновую ДФС).

Рассмотрим перестраиваемую ДФС, состоящую из двух ДЭ (рис. 1), дифференциальные сдвиги фаз которых отличаются в два раза. При этом возможны два варианта построения такой ДФС: линейно поляризованная волна поступает со стороны ДЭ с большим дифференциальным сдвигом фаз ($\Delta_1 = 2\Delta$, $\Delta_2 = \Delta$) и со стороны ДЭ с меньшим дифференциальным сдвигом фаз ($\Delta_1 = \Delta$, $\Delta_2 = 2\Delta$). Анализ таких структур проводится с использованием выражения (1). Рассчитанные зависимости углов разворота ДЭ φ и по-

ложения эффективной плоскости анизотропии эффективной ДФС ψ от Δ приведены на рис. 6. В обоих случаях угол разворота плоскостей анизотропии ДЭ составляет $\varphi = \arctg \sqrt{\frac{|\cos(3\Delta)|}{\cos\Delta}}$ (сплошная кривая на рис. 6). В первом случае положение эффективной плоскости анизотропии, как и для перестраиваемой полуволновой секции, составляет $\psi = \varphi/2$ (штриховая кривая на рис. 6). Во втором случае плоскость анизотропии эффективной ДФС составляет с плоскостью анизотропии крайних ДЭ угол $\psi = \frac{\pi}{4} - \arctg \frac{\cos(3\Delta) + \sqrt{|\cos(3\Delta)/\cos\Delta|} \sin \Delta}{\sqrt{|\cos(3\Delta)/\cos\Delta|} \cos(2\Delta)}$ (штрих-пунктирная кривая на рис. 6).

Зависимости амплитуды паразитной кросс-поляризованной волны от относительной частоты для двух вариантов перестраиваемой четвертьволновой ДФС, состоящей из развернутых на $\varphi = 60^\circ$ ДЭ, создающих дифференциальные сдвиги фаз 180° и 90° , приведены на рис. 7 (кривые 1 и 5). Из рисунка видно, что широкополосность преобразователя поляризации, в котором линейно поляризованная волна падает со стороны ДЭ, создающего дифференциальный сдвиг фаз 180° , (кривая 1), значительно превышает широкополосность преобразователя, в котором волна падает со стороны ДЭ, создающего дифференциальный сдвиг фаз 90° , (кривая 5), и широкополосность обычной четвертьволновой ДФС (кривая 4).

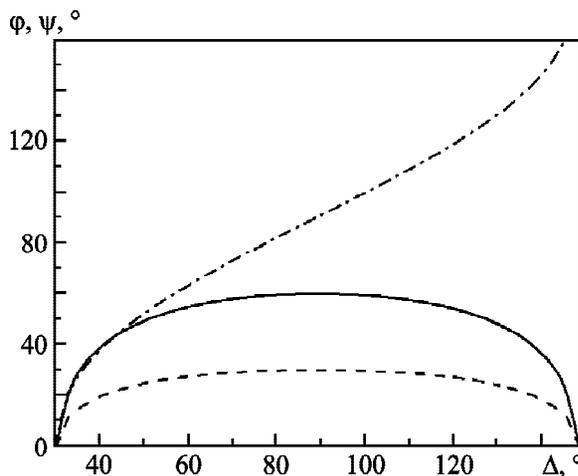


Рис. 6. Зависимости углов разворота φ (сплошная кривая) и ψ в случае $\Delta_1 = 2\Delta, \Delta_2 = \Delta$ (штриховая кривая) и $\Delta_1 = \Delta, \Delta_2 = 2\Delta$ (штрих-пунктирная кривая) от Δ для четвертьволновых ДФС

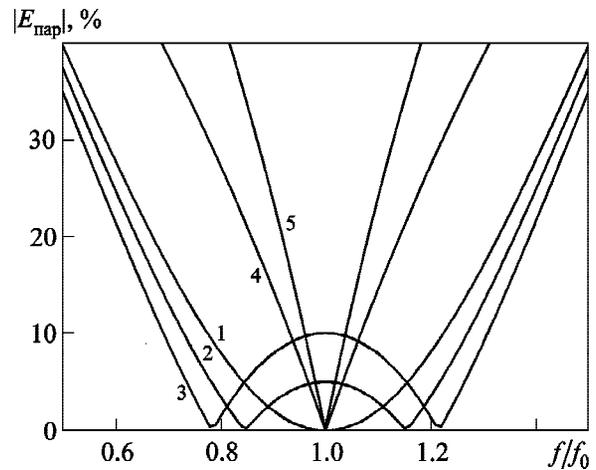


Рис. 7. Частотные зависимости амплитуды паразитной кросс-поляризованной волны на выходе четвертьволновых ДФС: широкополосной ДФС при угле разворота $\varphi = 60^\circ$ – кривая 1, $\varphi = 59^\circ$ – кривая 2, $\varphi = 58^\circ$ – кривая 3; обычной ДФС – кривая 4 и узкополосной ДФС – кривая 5

При допустимой амплитуде паразитной кросс-поляризованной волны $|E_{\text{пар}}| = 5\%$ относительная полоса рабочих частот составляет около 30%, а при допустимой $|E_{\text{пар}}| = 10\%$ – более 45%. Полоса рабочих частот обычных четвертьволновых ДФС при таких амплитудах паразитных волн составляет соответственно 7 и 15%. Ширина рабочей полосы частот преобразователя, в котором волна падает со стороны ДЭ, создающего дифференциальный сдвиг фаз 90° , уже, чем рабочая полоса обычной ДФС, при тех же значениях амплитуд паразитных волн полоса рабочих частот составляет соответственно около 4 и 8%.

В поляризационных фазовращателях и сдвигателях частоты полуволновая ДФС находится в поле волны с круговой поляризацией. В связи с отмеченным выше отличием в работе полуволновой ДФС в зависимости от вида поляризации поля, целесообразно рассмотреть работу широкополосной полуволновой ДФС в поле такой волны.

Поляризационная матрица рассеяния ДФС, схематически изображенной на рис. 4 в круговых поляризационных базисах на входе и выходе, имеет вид:

$$\hat{S} = \hat{G} \cdot \hat{S}_0 \cdot \hat{\phi}^* \cdot \hat{S}_0 \cdot \hat{\phi} \cdot \hat{S}_0 \cdot \hat{G}^*$$

где \hat{G}^* – матрица эрмитово-сопряженная к матрице \hat{G} . В идеальном случае при подаче

на вход ДФС сигнала с правой круговой поляризацией, $\vec{E}_{\text{вх}} = \begin{pmatrix} E_{\text{пр}} \\ E_{\text{лев}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$, волна на выходе должна иметь левую круговую поляризацию, $\vec{E}_{\text{вых}} = \begin{pmatrix} E_{\text{пр}} \\ E_{\text{лев}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$. Величина $E_{\text{пр}}$ в рассматриваемом случае является паразитным сигналом и имеет вид:

$$E_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \left[e^{i2\Delta} \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi + e^{i\Delta} \left(e^{i2\Delta} \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right) \right].$$

Частотные характеристики паразитного сигнала на выходе широкополосной полуволновой ДФС (при развороте средней секции на угол $\varphi = 60^\circ$), работающей в поле линейно поляризованной волны и в поле кругополяризованной волны, представлены кривыми 1 соответственно на рис. 8, а и рис. 8, б.

Рабочая полоса частот четвертьволновых и полуволновых широкополосных ДФС может быть еще более расширена путем уменьшения угла разворота осей анизотропии φ . В этом случае отсутствие паразитного кросс-поляризованного сигнала на выходе ДФС наблюдается на частотах, симметрично разнесенных относительно центральной. Уменьшение угла φ должно быть таким, чтобы это не привело к ухудшению параметров ДФС до уровня ниже предельно допустимого в диапазоне, ограниченном этими частотами. Частотные зависимости паразитного сигнала на выходе широкополосной ДФС в поле линейно поляризованной и в поле кругополяризованной волны для углов разворота $\varphi = 59^\circ$ и $\varphi = 58^\circ$ (кривые 2 и 3 соответственно) представлены на рис. 8, а и б. В отличие от паразитной составляющей на выходе полуволновой ДФС в поле линейно поляризованной волны паразитная составляющая на выходе ДФС, работающей в поле круговой поляризации, на центральной частоте остается равной нулю при любом развороте средней секции. При этом ее уровень ниже во всей полосе рабочих частот. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно при использовании ДФС в фазовых сдвигателях частоты, поскольку от этого напрямую зависит уровень спектра паразитной составляющей выходного сигнала.

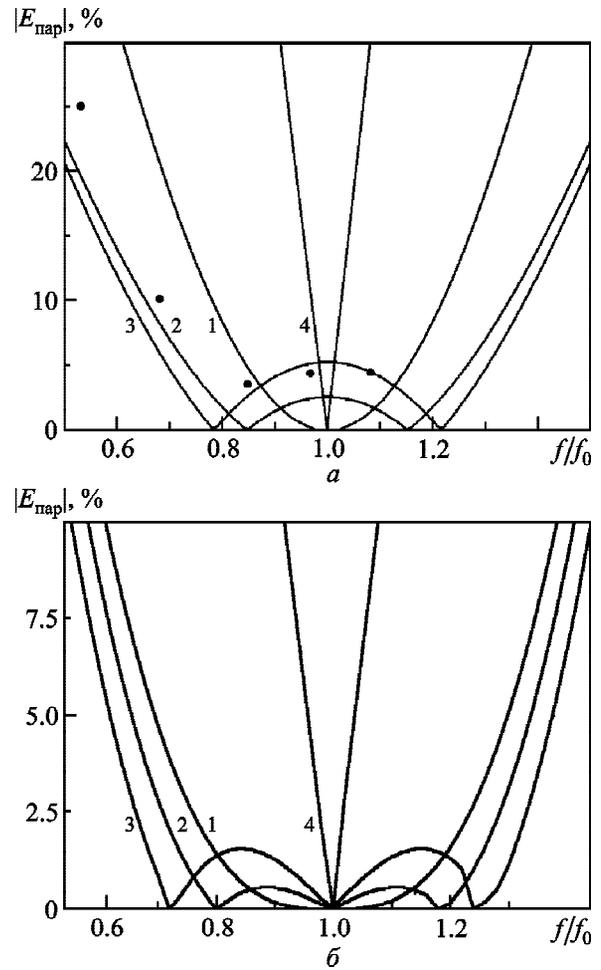


Рис. 8. Частотные зависимости паразитной составляющей на выходе широкополосной полуволновой ДФС, работающей в поле линейно поляризованной волны (а) и в поле кругополяризованной волны (б) при различных углах разворота среднего ДЭ: $\varphi = 60^\circ$ – кривая 1, $\varphi = 59^\circ$ – кривая 2, $\varphi = 58^\circ$ – кривая 3. Для сравнения представлена аналогичная зависимость для обычной полуволновой ДФС (кривая 4). Точками отмечены экспериментально измеренные значения амплитуды паразитного сигнала

3. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование возможности создания перестраиваемых и широкополосных ДФС было проведено в длинноволновой части терагерцевого диапазона. Для полного исследования перестраиваемых ДФС требуется источник излучения в очень широком диапазоне частот ($f_{\text{max}}/f_{\text{min}} = 3$ для четвертьволновых ДФС и $f_{\text{max}}/f_{\text{min}} = 5$ для полуволновых ДФС). В качестве источника излучения мы использовали анализатор СВЧ-цепей ELMICA G4402E, работающий в диапазоне частот 0.086 ± 0.11 ТГц без умноже-

ния частоты и в диапазоне $0.173 \div 0.225$ ТГц с умножением частоты, и твердотельный генератор на ЛПД фиксированной частоты 0.138 ТГц. Это обеспечило общий диапазон частот исследования $0.086 \div 0.225$ ТГц ($f_{\max}/f_{\min} = 2.6$), которого, тем не менее, недостаточно для полного анализа работы ДФС.

Вопрос расширения частотной полосы исследования может быть решен следующим образом. Зависимости углов разворота осей анизотропии ДЭ φ и положения эффективной плоскости анизотропии ψ от дифференциального сдвига фаз Δ обладают симметрией (осевой или вращательной) относительно $\Delta = 90^\circ$ для четвертьволновых ДФС и $\Delta = 180^\circ$ для полуволновых ДФС. Поэтому достаточно экспериментально исследовать ДФС в полосе частот вдвое меньшей, чем частотный диапазон, в котором возможна их перестройки. При этом дифференциальный сдвиг фаз, создаваемый используемыми ДЭ, может принимать значения 90° и 180° вблизи одного из краев исследуемого диапазона. В таком случае целесообразно использовать в эксперименте одни и те же ДЭ, создающие дифференциальный сдвиг фаз 90° вблизи низкочастотного края диапазона и сдвиг фаз 180° вблизи высокочастотного края диапазона.

При выборе ДЭ для экспериментального исследования следует учесть еще одно обстоятельство. Проведенное выше теоретическое рассмотрение было сделано в предположении полного согласования ДЭ с трактом. Наличие отражений может значительно ухудшить характеристики ДФС. В работах [2, 10] мы рассмотрели различные способы согласования структур, обладаю-

щих двулучепреломлением формы, но ни один из этих способов не обеспечивает согласование во всем диапазоне частот, в котором возможно реализовать перестраиваемые четвертьволновые и полуволновые ДФС. Однако достоинством таких структур является возможность путем выбора материалов и коэффициента заполнения получать низкие уровни отражения, которые не влияют в значительной мере на результат эксперимента.

Исходя из вышеизложенного, для экспериментальной проверки возможности создания перестраиваемых и широкополосных ДФС путем фрезерования были изготовлены идентичные ДЭ в виде двусторонней “гребенки” из полистирола (диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 2.5$) с периодом 0.5 мм и коэффициентом заполнения ≈ 0.4 с несущей перемычкой из сплошного полистирола толщиной 1.9 мм (рис. 9). Период выбран таким, чтобы избежать влияния высших дифракционных гармоник, а коэффициент заполнения – таким, чтобы без специальных способов согласования обеспечить минимальный коэффициент отражения. Глубина гребенки с каждой стороны составляет 3.4 мм, с тем расчетом, чтобы дифференциальный сдвиг фаз составлял 90° на частоте ≈ 0.1 ТГц и 180° на частоте ≈ 0.2 ТГц.

Экспериментальная установка, выполненная на полом диэлектрическом лучевом (ПДЛ) диаметром 20 мм [11], представлена на рис. 10. Основная часть установки содержит источник излучения 1, волноводно-лучеводные переходы 2 и 9, фильтрующий отрезок ПДЛ 3, линейные проволочные поляризаторы 4 и 8, вращающиеся сочленения 5 и 7, между которыми помещены исследу-

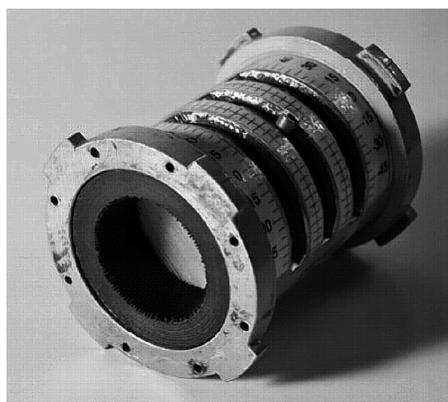
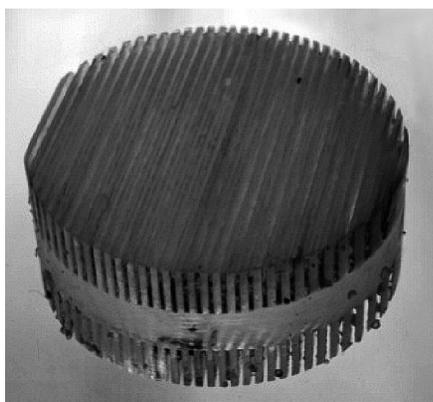


Рис. 9. Внешний вид ДЭ (слева) и макета исследуемой ДФС (справа)

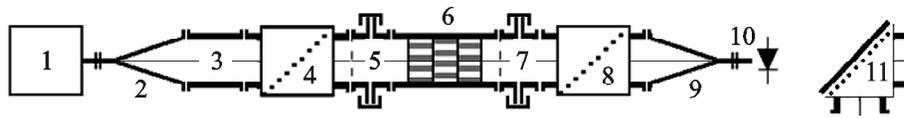


Рис. 10. Схема измерительной квазиоптической установки

мая ДФС 6 и детектор 10. При исследовании ДФС в поле кругополяризованной волны входной поляризатор 4 заменяется зеркально-решеточным перестраиваемым преобразователем плоскости поляризации 11. Корпус ДФС 6 также выполнен на основе ПДЛ диаметром 20 мм, в который могут быть помещены от одного до трех ДЭ с возможностью поворота каждого из них вокруг оси лучевода (рис. 9).

При размещении в корпусе ДФС одного ДЭ в панорамном режиме измерялись затухание и коэффициент отражения линейно поляризованных по осям анизотропии волн в полосе частот. Среднее значение затухания составило от 0.6 дБ в диапазоне $0.086 \div 0.11$ ТГц до 0.8 дБ в диапазоне $0.172 \div 0.225$ ТГц. Отмеченный при этом дихроизм ± 0.2 дБ связан, по всей видимости, с влиянием неполного согласования структуры. Коэффициент отражения во всей полосе составил -14 ± 6 дБ. Создаваемый ДЭ в полосе частот дифференциальный сдвиг фаз вычислялся по результатам измерения коэффициента эллиптичности сигнала на выходе ДЭ на фиксированных частотах (0.086, 0.1, 0.11, 0.138, 0.173, 0.2, 0.225 ТГц). Было установлено, что в исследуемом диапазоне частот дифференциальный сдвиг фаз, создаваемый ДЭ, линейно зависит от частоты и принимает значение 90° на частоте 0.102 ТГц и 180° на частоте 0.204 ТГц. Эти частоты принимаются за центральные при исследовании широкополосных соответственно четвертьволновых и полуволновых ДФС.

Перестраиваемая четвертьволновая ДФС исследовалась при размещении в корпусе двух ДЭ. Относительным разворотом осей анизотропии ДЭ и поворотом всей ДФС вокруг оси лучевода мы добивались максимального коэффициента эллиптичности (не хуже 0.98) на тех же фиксированных частотах диапазона. Коэффициент эллиптичности рассчитывался по отношению минимального уровня сигнала к максимальному при совместном вращении вращающегося сочленения 7, поляризатора 8 и детектора 9. Значения

отсчитываемых при этом углов φ и ψ с учетом линейной зависимости дифференциального сдвига фаз ДЭ от частоты нанесены на рис. 2 соответственно черными и белыми кружками.

При исследовании перестраиваемой полуволновой ДФС в ее корпус помещались три ДЭ. Оси анизотропии крайних ДЭ совмещались. Выходной поляризатор 8 устанавливался ортогонально входному поляризатору 4. Поворотом средней ДЭ и всей системы вокруг оси ПДЛ мы добивались минимума сигнала на выходе ДФС на тех же фиксированных частотах диапазона. Значения отсчитываемых при этом углов φ и ψ с учетом линейной зависимости дифференциального сдвига фаз ДЭ от частоты нанесены на рис. 2 соответственно черными и белыми квадратами.

Паразитный ортогональный сигнал на выходе широкополосной полуволновой ДФС, работающей в поле линейной поляризации, измерялся при параллельной установке крайних ДЭ и развороте среднего ДЭ на угол $\varphi = 59^\circ$. Его амплитуда в полосе частот отмечена точками на рис. 8, а.

Исследование широкополосных ДФС, на выходе которых основной поляризацией является круговая, состоит в измерении коэффициента эллиптичности r . Поэтому частотные зависимости паразитных составляющих на выходе ДФС целесообразно представить в виде частотных зависимостей коэффициента эллиптичности, пересчитанных по формуле $r = \frac{|E_{\text{осн}}| - |E_{\text{пар}}|}{|E_{\text{осн}}| + |E_{\text{пар}}|}$, где

$$|E_{\text{осн}}| = |E_{\text{пр}}|, \text{ а } |E_{\text{пар}}| = |E_{\text{лев}}| \text{ в выражении (2).}$$

Частотная зависимость коэффициента эллиптичности сигнала на выходе широкополосных четвертьволновой ДФС (кривая 1) и полуволновой ДФС (кривая 2) в поле кругополяризованной волны при $\varphi = 58^\circ$ представлены на рис. 11.

При исследовании широкополосной четвертьволновой ДФС два соседних ДЭ ориентировались параллельно, образуя таким образом полуволновую ДФС, а выходной ДЭ разворачивался

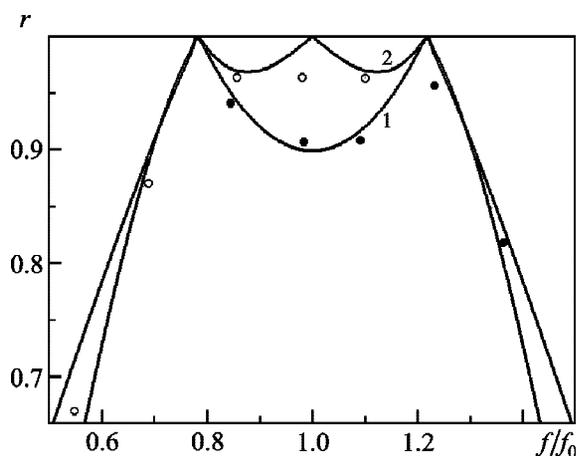


Рис. 11. Частотные зависимости коэффициента эллиптичности сигналов на выходе широкополосной четвертьволновой ДФС и широкополосной полуволновой ДФС в поле кругополяризованной волны при $\varphi = 58^\circ$. Черными и белыми кружками отмечены экспериментальные значения коэффициента эллиптичности, измеренные соответственно на выходах четвертьволновой и полуволновой ДФС

на угол $\varphi = 58^\circ$. Значения измеренного коэффициента эллиптичности на выходе ДФС в полосе частот отмечены на рис. 11 черными кружками. При исследовании широкополосной полуволновой ДФС в поле кругополяризованной волны входной поляризатор 4 заменялся зеркально-решеточным перестраиваемым преобразователем поляризации 11, на выходе которого на каждой заданной частоте мы добивались максимального коэффициента эллиптичности ($r \geq 0.98$). Значения измеренных при этом коэффициентов эллиптичности сигнала на выходе ДФС отмечены белыми кружками на рис. 11.

Проведенные экспериментальные исследования показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

4. Выводы

1. С помощью метода ПМР установлена возможность реализации перестраиваемых четвертьволновых и полуволновых ДФС, состоящих из нескольких ДЭ.

Для реализации перестраиваемой четвертьволновой ДФС достаточно двух одинаковых ДЭ, каждый из которых в диапазоне перестройки создает дифференциальный сдвиг фаз от 45° до 135° . Настройка при этом осуществляется разворотом плоскости анизотропии одного ДЭ отно-

сительно плоскости анизотропии другого на угол от 0° до 45° .

Перестраиваемая полуволновая ДФС может состоять из трех одинаковых ДЭ, каждый из которых в диапазоне перестройки создает дифференциальный сдвиг фаз от 60° до 300° . Настройка ДФС осуществляется разворотом плоскости анизотропии среднего ДЭ относительно плоскостей крайних ДЭ на угол от 0° до 60° .

Оба вида перестраиваемых ДФС могут быть реализованы из одних и тех же ДЭ, создающих в диапазоне перестройки дифференциальный сдвиг фаз от 60° до 135° .

2. В результате рассмотрения перестраиваемых ДФС сделан вывод о возможности реализации широкополосных четвертьволновых и полуволновых ДФС.

Широкополосная полуволновая ДФС состоит из трех одинаковых ДЭ, каждый из которых создает на центральной частоте диапазона дифференциальный сдвиг фаз 180° , а плоскость анизотропии среднего ДЭ развернута на угол $58^\circ \div 60^\circ$. Широкополосная четвертьволновая ДФС состоит из двух ДЭ, создающих на центральной частоте диапазона дифференциальные сдвиги фаз 90° и 180° и развернутых на угол $58^\circ \div 60^\circ$. Причем ДЭ, создающий дифференциальный сдвиг фаз 180° , располагается со стороны падения линейно поляризованного колебания. Широкополосность таких ДФС в несколько раз превышает широкополосность отдельного ДЭ.

3. Проведенное экспериментальное исследование подтвердило возможность построения перестраиваемых и широкополосных ДФС. В дальнейшем предполагается создание на их основе перестраиваемых и широкополосных преобразователей поляризации, вращателей плоскости поляризации, поляризационных фазовращателей и сдвигателей частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
2. Bezborodov V. I., Kosiak O. S., Kuleshov Ye. M., and Yachin V. V. Differential Phase Sections Based on Form Birefringence in the THz Frequency Range // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, Is. 8. – P. 735–744. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i8.70
3. Tydex, 2016. [viewed 12 October 2016]. Available from: http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_converters/

4. Koester C. J. Achromatic Combinations of Half-Wave Plates // *J. Opt. Soc. Am.* – 1959. – Vol. 49, Is. 4. – P. 405–409. DOI: 10.1364/JOSA.49.000405
5. Adachi S. and Kennaugh E. M. The Analysis of a Broad-Band Circular Polarizer Including Interface Reflections // *IRE Trans. Microw. Theory Tech.* – 1960. – Vol. 8, No. 5. – P. 520–525. DOI: 10.1109/TMTT.1960.1124780
6. Pancharatnam S. Achromatic combinations of birefringent plates. Part I. An achromatic circular polarizer // *Proc. Ind. Acad. Sci. A.* – 1955. – Vol. A 41, Is. 4. – P. 130–136. DOI: 10.1007/BF03047097
7. Iwanaga M. Subwavelength orthogonal polarization rotator // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35, Is. 2. – P. 109–111. DOI: 10.1364/OL.35.000109
8. Hanany S., Hubmayr J., Johnson B. R., Matsumura T., Oxley P., and Thibodeau M. Millimeter-Wave Achromatic Half Wave Plate // *Appl. Opt.* – 2005. – Vol. 44, Is. 22. – P. 4666–4670. DOI: 10.1364/AO.44.004666
9. Канарейкин Д. Б., Павлов Н. Ф., Потехин В. А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
10. Bezborodov V. I., Kosiak O. S., Kuleshov Ye. M., and Yachin V. V. Form Birefringent Structures Matching to Free Space in the Terahertz Frequency Range // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2015. – Vol. 74, Is. 19. – P. 1767–1776. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i19.90
11. Кулешов Е. М. Глава 8. Измерения в субмиллиметровом диапазоне радиоволн / Радиоэлектроника и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн / Под ред. А. Я. Усикова. – Киев: Наукова думка, 1986. – С. 140–157.

REFERENCES

1. BORN, M. and WOLF, E., 1968. *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press.
2. BEZBORODOV, V. I., KOSIAK, O. S., KULESHOV, Ye. M., YACHIN, V. V., 2015. Differential Phase Sections Based on Form Birefringence in the THz Frequency Range. *Telecommunications and Radio Engineering.* vol. 74, is. 8, pp. 735–744. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i8.70
3. Tydex, 2016. [viewed 12 October 2016]. Available from: http://www.tydexoptics.com/ru/products/thz_optics/thz_converters/
4. KOESTER, C. J., 1959. Achromatic Combinations of Half-Wave Plates. *J. Opt. Soc. Am.* vol. 49, is. 4, pp. 405–409. DOI: 10.1364/JOSA.49.000405
5. ADACHI, S. and KENNAUGH, E. M., 1960. The Analysis of a Broad-Band Circular Polarizer Including Interface Reflections. *IRE Trans. Microw. Theory Tech.* vol. 8, no. 5, pp. 520–525. DOI: 10.1109/TMTT.1960.1124780
6. PANCHARATNAM, S., 1955. Achromatic combinations of birefringent plates. Part I. An achromatic circular polarizer. *Proc. Ind. Acad. Sci. A.* vol. A 41, is. 4, pp. 130–136. DOI: 10.1007/BF03047097
7. IWANAGA, M., 2010. Subwavelength orthogonal polarization rotator. *Opt. Lett.* vol. 35, is. 2, pp. 109–111. DOI: 10.1364/OL.35.000109
8. HANANY, S., HUBMAYR, J., JOHNSON, B. R., MATSUMURA, T., OXLEY, P. and THIBODEAU, M., 2005.

- Millimeter-Wave Achromatic Half Wave Plate. *Appl. Opt.* vol. 44, is. 22, pp. 4666–4670. DOI: 10.1364/AO.44.004666
9. KANAREIKIN, D. B., PAVLOV N. F. and POTEKHIN, V. A., 1966. *Polarisation of radar signals*. Moscow: Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
10. BEZBORODOV, V. I., KOSIAK, O. S., KULESHOV, Ye. M. and YACHIN, V. V., 2015. Form Birefringent Structures Matching to Free Space in the Terahertz Frequency Range. *Telecommunications and Radio Engineering.* vol. 74, is. 19, pp. 1767–1776. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i19.90
11. KULESHOV, Ye. M., 1986. Chapter 8. Measurements in sub-mm wavelength band. In: A. Y. USIKOV, ed. *Electronics and Radio Physics of Millimeter and Sub-millimeter Waves*. Kyiv: Naukova Dumka Publ., pp. 140–157 (in Russian).

O. S. Kosiak, V. I. Bezborodov, Ye. M. Kuleshov, and P. K. Nesterov

O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

TUNABLE AND BROADBAND DIFFERENTIAL PHASE SECTIONS IN TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

Purpose: Studying the quasioptical tunable and broadband differential phase section (DPS) consisting of several birefringent elements (BE) on the basis of form birefringence effect.

Design/methodology/approach: Using the polarization scattering matrix method, the impact of the mutual rotation axis of anisotropy of several BE by the amount of phase shift and the position of the plane of anisotropy of resulting DPS is considered.

Findings: The DPS tunable in a wide range are shown to be possibly implemented in the case of quarter-wave DPS of two, and in the case of half-wave DPS of three, identical non-tunable BE. The analysis has shown to the possibility of creating a broadband quarter-wave and half-wave DPS.

Conclusions: Experimental research has confirmed the possibility of constructing a tunable and broadband DPS. On this basis, tunable and broadband polarization converters, rotators of polarization plane, polarization phase shifters and frequency shifters in the terahertz frequency range can be created.

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

O. C. Косяк, В. І. Безбородов, Є. М. Кулешов, П. К. Нестеров

Інститут радіофізики та електроніки ім. А. Я. Усикова НАН України, вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна

ПЕРЕСТРОЮВАНІ Й ШИРОКОСМУТОВІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ФАЗОВІ СЕКЦІЇ В ТЕРАГЕРЦОВОМУ ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ

Предмет і мета роботи: Досліджуються квазіоптичні перестроювані й широкосмутові диференціальні фазові секції (ДФС), що складаються з декількох двоприменезаломлюючих елементів (ДЕ) на основі ефекту двоприменезаломлення форми.

Методи та методологія: За допомогою методу поляризаційних матриць розсіяння розглядається вплив взаємного розвороту осей анізотропії декількох ДЕ на величину зсуву фаз і положення площини анізотропії результуючої ДФС. *Результати:* Показано, що перестроювані в широкому діапазоні частот ДФС можуть бути реалізовані у разі чвертьхвильової ДФС з двох, а у разі напівхвильової – з трьох однакових неперестроюваних ДЕ. В результаті аналізу зроблено висновок про можливість створення широкосмугових чвертьхвильових і напівхвильових ДФС.

Висновок: Експериментальне дослідження підтвердило можливість побудови перестроюваних та широкосмугових ДФС. На їх основі можливе створення перестроюваних та широкосмугових перетворювачів поляризації, обертачів площини поляризації, поляризаційних фазообертачів та зсувачів частоти в терагерцевому діапазоні частот.

Ключові слова: терагерцевий діапазон, квазіоптика, диференціальна фазова секція, двопронезаломлення

Стаття постуила в редакцію 26.09.2016