

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ РАДІОФІЗИКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ ім. О. Я. УСИКОВА

Косяк Олег Сергійович

УДК 537.533.31:621.396.624

**КВАЗІОПТИЧНІ ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

01.04.03— радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної академії наук України

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, старший науковий
 співробітник
 Кузьмичов Ігор Костянтинович,
 Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
 НАН України (м. Харків),
 провідний науковий співробітник відділу теорії
 дифракції та дифракційної електроніки

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
 Маслов Вячеслав Олександрович,
 Харківський національний університет імені
 В. Н. Каразіна МОН України (м. Харків),
 завідувач кафедри квантової радіофізики

 доктор фізико-математичних наук, старший науковий
 співробітник
 Грибовський Олександр Володимирович,
 Радіоастрономічний інститут НАН України
 (м. Харків), провідний науковий співробітник відділу
 теоретичної радіофізики

Захист дисертації відбудеться 28 грудня 2017 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

Автореферат розісланий 27 листопада 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертаційна робота присвячена дослідженню квазіоптичних перетворювачів поляризації (КПП) терагерцового (ТГц) діапазону частот, які засновані на ефекті подвійного променезаломлення форми. Тут і надалі під терміном «подвійне променезаломлення форми» будемо мати на увазі термін «form birefringence», який ввів М. Борн в зв'язку з розглядом анізотропії, що виникає в структурах з ізотропних діелектриків різної геометрії.

Актуальність теми. Надзвичайно важлива особливість ТГц діапазону частот полягає в можливості та доцільності використання принципів і методів квазіоптики (КО), що дозволяють поєднувати хвильовий та оптичний підходи при розробці методів і засобів вимірювання параметрів радіохвиль і радіокіл в цьому діапазоні. Квазіоптичні принципи дозволяють зняти ряд принципових фізичних і технологічних обмежень, які пов'язано з проблемою мікромініатюризації хвилеводних структур і компонентів. Квазіоптичні радіовимірювальні методи та засоби довгохвильової ділянки ТГц діапазону на основі тих чи інших видів порожнистих діелектричних хвилеводів (ПДХ) вже успішно застосовуються для діагностики плазми на експериментальних установках термоядерного синтезу, в радіоспектроскопічних дослідженнях діелектриків, феритів, напівпровідників, композитів та інших матеріалів і речовин, в радіохвильовій еліпсометрії, біофізичних дослідженнях тощо.

Слід вказати на ще одну важливу перевагу КО при створенні радіовимірювальних засобів для фізичних досліджень – це можливість широкого використання поляризаційних принципів і методів перетворення хвильових пучків в КО трактах, побудованих на основі хвилеводних структур класу ПДХ і їм подібних. Ці принципи побудови радіоприймальної апаратури базуються на широкому застосуванні різних анізотропних структур. Використання поляризаційних принципів дозволяє різко підвищити інформативність вимірювальних сигналів і, крім того, дає можливість у ряді випадків істотно покращити технічні параметри приладів і пристроїв, підвищити чутливість і точність вимірювань, а також значно розширити область застосування КО радіовимірювальних методів і засобів в ТГц діапазоні частот.

В даний час процес подальшого вивчення ТГц діапазону стримує недостатньо повне уявлення про фізику роботи КПП та відсутність практичних методичних рекомендацій по їх виконанню. В дисертації досліджуються фізичні аспекти поляризаційних перетворень у штучних структурах ТГц діапазону частот та розглянуто роботу ряду поляризаційних пристроїв на їх основі. Вивчення фізичних процесів, що відбуваються в КПП, є важливими й актуальними, оскільки вони спрямовані на підвищення ефективності приймально-вимірювальних пристроїв та систем ТГц діапазону, на пошук нових способів керування параметрами ТГц випромінювання, що дозволяють розширити можливості та області застосування приладів цього частотного діапазону.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дану роботу виконано у відділі квазіоптики (2014-2017 рр.) Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України у межах держбюджетних науково-дослідних робіт «Розвинення методів і засобів оптики і квазіоптики для встановлення закономірностей та особливостей взаємодії терагерцового випромінювання з фізичними і біологічними об'єктами» (шифр «Ореол», державний реєстраційний номер теми: 0111U001079, 01.01.2012-31.12.2016 рр.), «Розвиток і застосування оптичних і квазіоптичних методів для дослідження процесів генерації і перетворення електромагнітних хвиль терагерцового, інфрачервоного і видимого діапазонів» (шифр «Ореол-1», державний реєстраційний номер теми: 0117U004036, 01.01.2017-31.12.2021).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у визначенні фізичних закономірностей та особливостей взаємодії електромагнітних хвиль із квазіоптичними поляризаційними перетворювачами на основі штучних структур з подвійним променезаломленням в ТГц діапазоні частот і виробленні практичних рекомендацій щодо їх розробки та застосування.

Для досягнення поставлених цілей необхідно було вирішити такі завдання:

- з'ясувати можливості створення в ТГц діапазоні структур на основі ефекту подвійного променезаломлення форми та провести їх теоретичні і експериментальні дослідження;

- провести теоретичний аналіз та експериментальні дослідження з узгодження структур, що мають властивість подвійного променезаломлення форми, з квазіоптичним трактом;

- виконати теоретичні й експериментальні дослідження зі створення диференційних фазових секцій, що перестроюються, та ширококугових диференційних фазових секцій на основі структур з подвійним променезаломленням форми;

- виконати експериментальні дослідження ширококугових диференційних фазових секцій у квазіоптичних приладах ТГц діапазону частот, які включають:

- а) розробку й експериментальне дослідження ширококугового обертача площини поляризації лінійно поляризованої хвилі;

- б) розробку й експериментальне дослідження ширококугового поляризаційного фазообертача.

Об'єктом дослідження є фізичні процеси взаємодії поляризованих електромагнітних хвиль з анізотропними структурами.

Предметом дослідження є особливості взаємодії та перетворення електромагнітних хвиль у квазіоптичних лініях передачі класу «порожнистий діелектричний хвилевід», до складу яких включені анізотропні структури.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано наступні методи дослідження:

- модифікований матричний метод, який використовує апарат хвильової матриці розсіювання в поєднанні з поданням парціальних хвиль у формі векторів Джонса для аналізу процесів поляризаційних перетворень у

квазіоптичних електродинамічних структурах, що супроводжуються багаторазовим перевідбиванням хвиль;

- чисельний метод інтегральних функціоналів у частотній області для багатомодової задачі розсіювання;
- стандартні хвилеводні та оригінальні квазіоптичні методи вимірювань амплітудно-фазових і поляризаційних характеристик розсіювання електродинамічних структур.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі на підставі теоретичного аналізу й експериментальних досліджень встановлені фізичні закономірності й особливості взаємодії електромагнітних хвиль із квазіоптичними поляризаційними перетворювачами на основі штучних структур із подвійним променезаломленням форми в ТГц діапазоні. При цьому отримані такі нові результати:

1. Вперше створено та досліджено структури з подвійним променезаломленням форми. Показано, що при $\alpha < 0,2$ ($\alpha = t/\lambda$, t – період структури, λ – довжина хвилі) розрахунок таких структур з достатньою для практичних цілей точністю може бути проведений за аналітичними виразами.

2. Вперше запропоновано способи узгодження структур з подвійним променезаломленням форми із квазіоптичним трактом за допомогою елементів самої структури.

3. Вперше запропоновано і реалізовано перестроювані та ширококутові чвертьхвильові та напівхвильові диференційні фазові секції (ДФС), що складаються з декількох елементів із подвійним променезаломленням (ЕПП), що не перестроюються.

4. Вперше створено та експериментально досліджено ширококутові обертач площини поляризації та поляризаційний фазообертач. Застосування в них ширококутових ДФС дозволило розширити їх робочу смугу частот більше ніж в два рази, зменшити поляризаційні втрати та фазову похибку.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено науково-технічну базу для створення квазіоптичних перетворювачів поляризації в ТГц діапазоні частот. Результати дослідження автора можуть знайти застосування:

- при створенні еліпсометрів ТГц діапазону частот;
- при створенні мікрокомпактних полігонів;
- при створенні фазообертачів і зсувувачів частот ТГц діапазону частот;
- при вивченні фізичних процесів взаємодії хвиль ТГц діапазону з електродинамічними структурами, матеріалами та середовищами, а також при розробці КО радіовимірювальних приладів та компонентів систем загального та спеціального застосування на основі різних видів ПДХ в зазначеному діапазоні частот.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі узагальнені матеріали досліджень, отриманих в співавторстві за безпосередньої участі здобувача. Зі спільних публікацій в дисертації використані лише ті матеріали, в яких автору належить значний внесок: постановка задачі та цілі

дослідження; обговорення теоретичних і експериментальних методів вирішення задачі; розробка радіовимірювальних засобів і методик; фізична інтерпретація і узагальнення отриманих результатів. Фізичні ідеї, методи їх дослідження, наукова новизна отриманих результатів і висновки належать автору особисто. Матеріали дисертації опубліковано у 10 наукових працях, з них 5 статей у фахових наукових журналах, 5 доповідей на міжнародних наукових конференціях.

У роботі [1] автору належить постановка задачі та цілі дослідження, ідея побудови диференційної фазової секції та використання методу інтегральних функціоналів для її розрахунку, фізична інтерпретація, узагальнення і експериментальна перевірка отриманих результатів.

У роботі [2] автору належить постановка задачі та цілі дослідження, ідея узгодження структур з подвійним променезаломленням за допомогою елементів власно структур, фізична інтерпретація, узагальнення і експериментальна перевірка отриманих результатів.

У роботі [3] автору належить постановка задачі та цілі дослідження, ідея створення перестроюваних і широкосмугових секцій з декількох елементів з подвійним променезаломленням, проведення експерименту та інтерпретація отриманих даних.

У роботі [4] автору належить постановка задачі та цілі дослідження, ідея використання широсмугової напівхвильової ДФС на основі структур із штучним подвійним променезаломленням як обертача площини поляризації, проведення експерименту та інтерпретація отриманих даних.

У роботі [5] автору належить ідея застосування в поляризаційному фазообертачі широкосмугових ДФС на основі структур із штучним подвійним променезаломленням, проведення експерименту та інтерпретація отриманих даних.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи неодноразово обговорювалися на науково-кваліфікаційному семінарі «Радіофізика та електроніка мм і субмм діапазонів хвиль» Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, а також було повідомлено на п'яти конференціях, симпозіумах і семінарах: 13th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, December 2-6, 2013 / О. Ya. Usikov IRE NASU (Kharkov, Ukraine); MIKON 2014, 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communications, June 16-18, 2014 (Gdansk, Poland); 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, October 14-17, 2014 / О. Ya. Usikov IRE NASU (Kharkov, Ukraine); International Young Scientists Forum on Applied Physics September 29 - October 2, 2015 (Dnipropetrovsk, Ukraine); MIKON 2016 - 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications, May 9-11, 2016 (Krakow, Poland); 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 29 - June 2 2017 (Kyiv, Ukraine).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано у 10 наукових працях, з них 5 статей у фахових наукових журналах, 5 доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Її повний обсяг складає 149 сторінок. Дисертація містить 59 рисунків. Список використаних джерел на 12 сторінках нараховує 104 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми та її зв'язок із науковими програмами, визначаються мета та завдання дослідження. Наведені новизна та практичне значення отриманих результатів. Висвітлено особистий внесок автора, апробацію та публікацію результатів дослідження.

У **розділі 1** представлено огляд літератури за темою дисертаційної роботи. Розглянуто квазіоптичні хвильоводні тракти ТГц діапазону частот типу ПДХ. В результаті аналізу різних видів ПДХ зроблено висновок про доцільність використання порожнистого діелектричного променеводу (ПДП) для макетування КПП. Розглянуто різні типи субхвильових структур і зроблено висновок про можливість використання структур із подвійним променезаломленням форми для створення на їх основі КПП. Обрано теоретичні й експериментальні методи досліджень.

У **розділі 2** розглядаються структури з подвійним променезаломленням, що представляють собою багат шаровий набір діелектричних пластин з товщинами t_1 , t_2 , (рис. 1) і діелектричними проникностями, відповідно ε_1 , ε_2 , що чергуються.

Відомі вирази для показників заломлення для хвиль, поляризованих паралельно і перпендикулярно пластинам

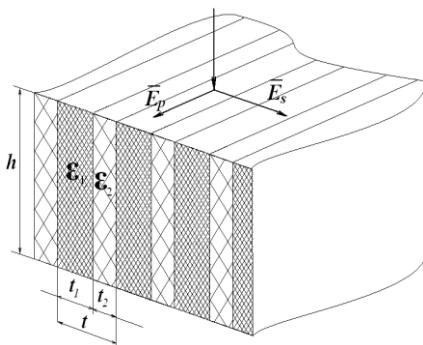


Рисунок 1 – Структура з паралельних діелектричних пластин, що має властивість подвійного променезаломлення

$$n_p = \sqrt{F \cdot \varepsilon_1 + (1-F) \cdot \varepsilon_2},$$

$$n_s = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{F \cdot \varepsilon_2 + (1-F) \cdot \varepsilon_1}},$$

де $F=t_1/(t_1+t_2)$, при $t \ll \lambda$ не залежать від частоти. Якщо розмір t_1+t_2 порівняний з довжиною хвилі, ці вирази стають невірними. Для аналізу таких структур був застосований чисельний метод інтегральних функціоналів в частотній області для багатомодової задачі розсіювання. Суть методу полягає в розгляді структури як щільноукладених

магнітодіелектричних плоских хвильоводів. Вихідними рівняннями для вирішення задачі розсіювання на такій структурі є інтегральні рівняння макроскопічної електродинаміки:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) + (\text{grad div} + k^2) \vec{\Pi}^e - ik\mu \text{rot} \vec{\Pi}^m,$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_0(\vec{r}) + (\text{grad div} + k^2) \vec{\Pi}^m - ik\varepsilon \text{rot} \vec{\Pi}^e.$$

Використовуючи комп'ютерну програму, що побудована на основі даного методу, було проведено чисельне дослідження розсіювання хвиль для періодичних структур з різним періодом, коефіцієнтом заповнення і діелектричними проникностями шарів.

Для знаходження ефективних показників заломлення структури з подвійним променезаломленням розраховувалася залежність фаз коефіцієнтів проходження по осях анізотропії φ_p, φ_s від відносної довжини $h=L/\lambda$. Зміна фази коефіцієнта проходження на 360° відповідає зміні довжини секції на величину $\Delta L = \lambda/n$ (або зміні відносної довжини секції на величину $\Delta h = \Delta L/\lambda$). З чого слідує прості вирази для n_p та n_s : $n_p = 1/\Delta h_p$, $n_s = 1/\Delta h_s$.

На рис. 2 суцільними кривими представлені фазові характеристики для структури слюда ($\varepsilon=6,9$) – лавсан ($\varepsilon=3$) з відносним періодом $\alpha = t/\lambda = 0,35$ та коефіцієнтом заповнення $F=0,6$. Частотні залежності відносної зміни сталих ефективних показників заломлення n_p, n_s і показника подвійного променезаломлення Δn від α , для структур полістирол-повітря та слюда-лавсан наведені на рис. 3.

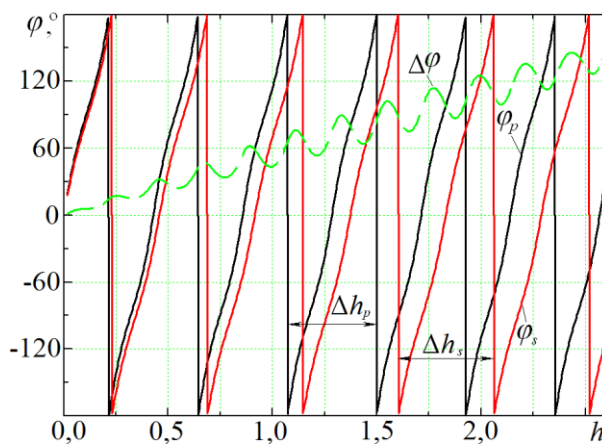


Рисунок 2 – Залежність фаз коефіцієнтів проходження по осях анізотропії φ_p, φ_s та їх різниця $\Delta\varphi$ від h для структури слюда-лавсан

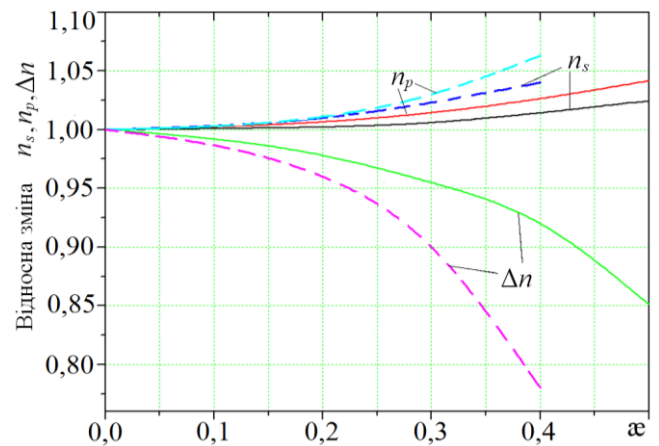


Рисунок 3 – Частотні залежності відносної зміни сталих значень n_p, n_s та Δn структур: суцільними лініями – полістирол-повітря, пунктирними – слюда-лавсан

Достовірність отриманих результатів була перевірена експериментально.

У розділі 3 розглянуто способи узгодження структури з подвійним променезаломленням із квазіоптичним трактом.

Відомі способи узгодження ДФС вибором їх осьового розміру (для напівхвильових ДФС) або за допомогою нанесення просвітлюючого чвертьхвильового шару діелектрика було розглянуто з позиції застосування їх для узгодження структур, що мають властивість подвійного променезаломлення форми. Оскільки розрахунок структур здійснювався чисельним методом, запропоновано графічний метод знаходження параметрів структури для таких видів узгодження.

Поряд з цим було запропоновано й розглянуто два способи узгодження, за допомогою елементів самої структури з подвійним променезаломленням.

У першому способі, умовно названому «ізо­тропним» узгодженням, узгоджувальний шар було утворено пластинами одного з діелектриків з повітряними пазами, виконаними з тим же періодом і коефіцієнтом заповнення $F = t_1 / (t_1 + t_2)$, які має сама структура з подвійним променезаломленням, що виступають над поверхнею структури на висоту h (рис. 4, а).

У другому випадку, умовно названому «анізотропним» узгодженням, узгодження здійснюється одним із діелектриків структури без поперечних пазів, що виступає над її поверхнею (рис. 4, б). Наведено графічний метод розрахунку параметрів структури, що забезпечує такі види узгодження.

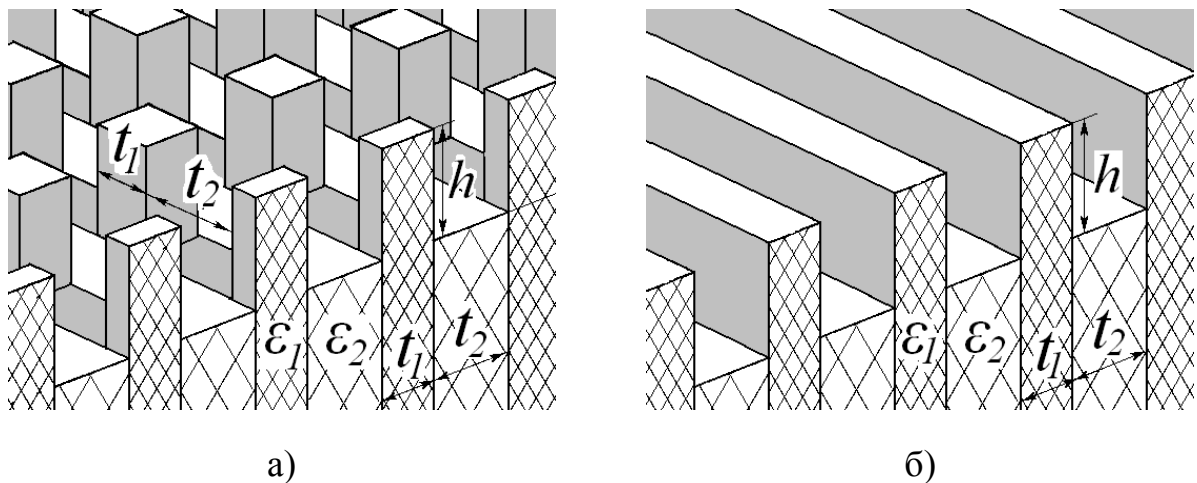


Рисунок 4 – Узгодження структури з подвійним променезаломленням за допомогою елементів самої структури: а) «ізо­тропне» узгодження; б) «анізотропне» узгодження

Частотні залежності коефіцієнтів відбиття по осях анізотропії (R_p і R_s) для структури лавсан-тефлон, що узгоджені запропонованими способами, наведені на рис. 5.

При «ізотропному» узгодженні досягається більш глибокий мінімум коефіцієнта відбиття на центральній частоті. При цьому рівень і смуга частот узгодження практично не залежать від того, який з діелектриків, що утворюють структуру з подвійним променезаломленням, формує узгоджувальний шар.

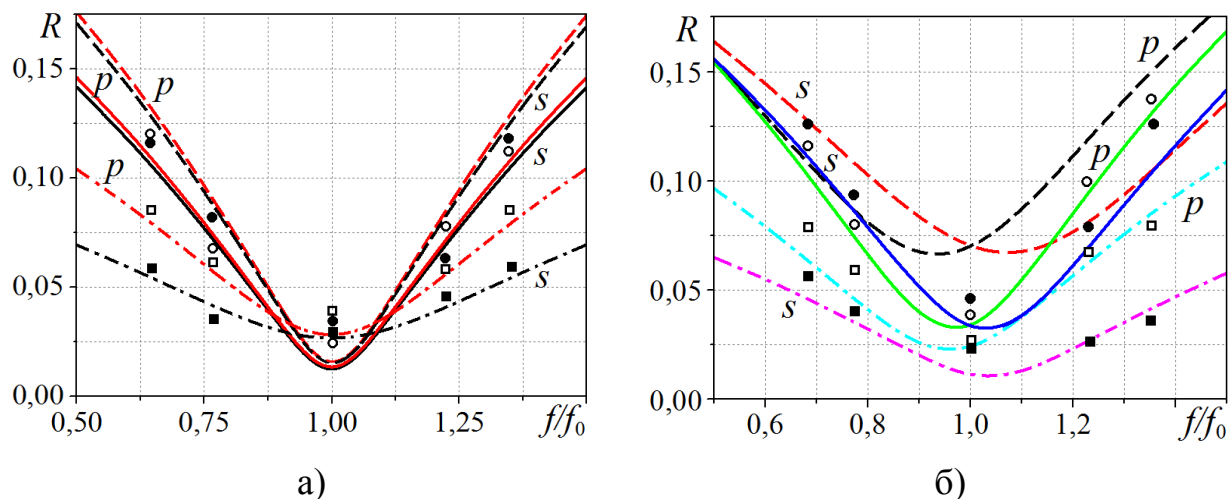


Рисунок 5 – Частотні залежності коефіцієнтів відбиття від напівнескінченної структури лавсан-тефлон: а) при «ізотропному» узгодженні: при виступаючому тефлоні ($\circ$, $\bullet$ – відповідно експериментальні значення R_p і R_s); при виступаючому лавсані ($\square$ – R_p , $\blacksquare$ – R_s); б) при «анізотропному» узгодженні: при виступаючому тефлоні ($\circ$, $\bullet$ – відповідно експериментальні значення R_p і R_s); лавсан-тефлон при виступаючому лавсані

При «анізотропному» узгодженні частотна характеристика стає асиметричною відносно центральної частоти, а рівень узгодження стає залежним від того, який з діелектриків утворює узгоджувальний шар. Цей спосіб узгодження впливає на величину диференційного зсуву фаз, який створюється структурою. Краще узгодження має місце, коли узгоджувальний шар виконано з діелектрика з меншою діелектричною проникністю.

При допустимому рівні коефіцієнта відбиття $\sim 0,1$ (-20дБ) смугові властивості обох видів узгодження приблизно однакові. Основною перевагою «анізотропного» способу узгодження в порівнянні з «ізотропним» є можливість його використання в більш короткохвильовій частині ТГц діапазону.

Експериментальні дослідження підтвердили достовірність отриманих результатів.

У розділі 4 розглядаються ДФС, що перестроюються та широкосмугові ДФС в ТГц діапазоні частот. ДФС на основі ефекту подвійного променезаломлення форми мають істотний недолік – секції виконуються з прецизійною точністю для роботи на конкретній частоті і не можуть бути перестроєні в процесі роботи. При створенні фазових секцій, що перестроюються, в цьому діапазоні використовувався принцип, який полягає в послідовному включенні декількох ЕПП, оптичні осі яких розгорнуті на

деякий кут. При цьому для простоти пристроїв і зручності їх налаштування використовувалася мінімальна кількість ЕПП з мінімальною кількістю регулювань.

Чвертьхвильова ДФС, що перестроюється, була виконана з двох ідентичних, розгорнутих на деякий кут φ , ЕПП (рис. 6).

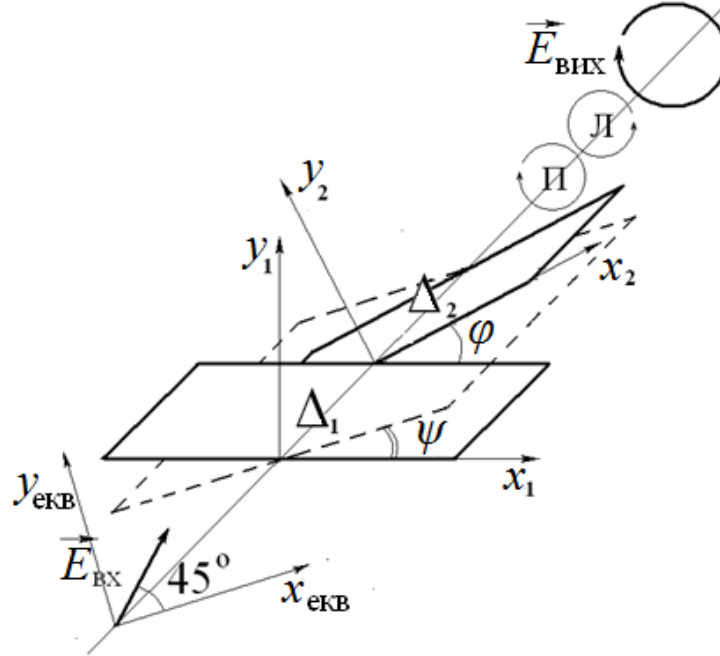


Рисунок 6 – Схема чвертьхвильової ДФС, що перестроюється

Аналіз чвертьхвильової ДФС, що перестроюється, був виконаний методом поляризаційної матриці розсіювання (ПМР) в лінійному вхідному поляризаційному базисі $[x_{\text{екв}}, y_{\text{екв}}]$ і круговому вихідному поляризаційному базисі $[п, л]$. Проведений аналіз показав можливість реалізації чвертьхвильової ДФС, що перестроюється, при диференційному зсуві фаз, що створюється кожним з ЕПП від 45° до 135° . При цьому, кут розвороту осей анізотропії ЕПП φ є пов'язаним з диференціальним зсувом фаз, що створюється на даній частоті кожним ЕПП, за допомогою співвідношення:

$$\varphi = \arctg \sqrt{-\cos 2\Delta},$$

а ефективна вісь анізотропії результуючої ДФС (на рис. 6 зображена пунктирною лінією) повернута відносно осі анізотропії першої пластини на кут:

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

Напівхвильова ДФС, що перестроюється (рис. 7), була виконана з трьох ідентичних ЕПП. При цьому вісі анізотропії крайніх ЕПП паралельні, а вісь анізотропії середньої повернута на кут φ .

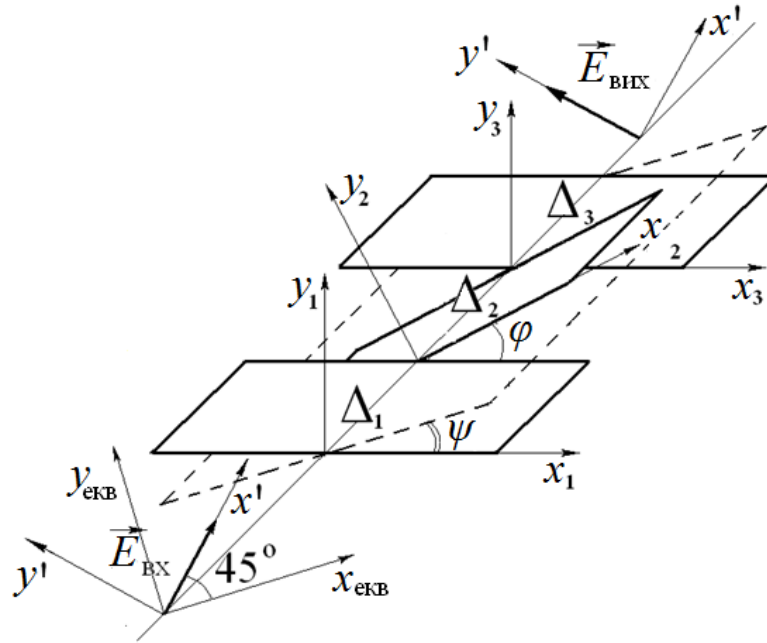


Рисунок 7 – Схема напівхвильової ДФС, що перестроюється

Аналіз напівхвильової ДФС, що перестроюється, виконано методом ПМР в єдиному поляризаційному базисі $[x', y']$. Він показав можливість реалізації напівхвильової ДФС, що перестроюється, якщо диференціальний зсув фаз кожного з елементів складає від 60° до 300° .

Для реалізації напівхвильової ДФС кут розвороту осі анізотропії середнього ЕПП, відносно осі анізотропії крайніх ЕПП, повинен складати:

$$\varphi = \arctg \left(\sqrt{\frac{-\cos(3\Delta/2)}{\cos(\Delta/2)}} \right),$$

а вісь анізотропії ефективної ДФС становить з тією ж віссю кут:

$$\psi = \varphi / 2,$$

тобто дана вісь знаходиться в бісектральній площині між осями анізотропії ЕПП, що входять до його складу.

З наведеного розгляду випливає, що як чвертьхвильова, так і напівхвильова ДФС, що перестроюються, можуть бути реалізовані з одних і тих же ідентичних ЕПП, якщо вони створюють на центральній частоті диференціальний зсув фаз від 60° до 135° .

Було проведено порівняння ширини робочої смуги ДФС, що перестроюються, з шириною робочої смуги одиночної ДФС. На рис. 8 наведено залежності відношення ширини робочої смуги ДФС, що перестроюються, до ширини робочої смуги одиночної ДФС на рівні величини паразитної складової $|E_{\text{пар}}|=0,1(-20\text{дБ})$ від величини диференційного зсуву фаз Δ , що створюється кожним ЕПП.

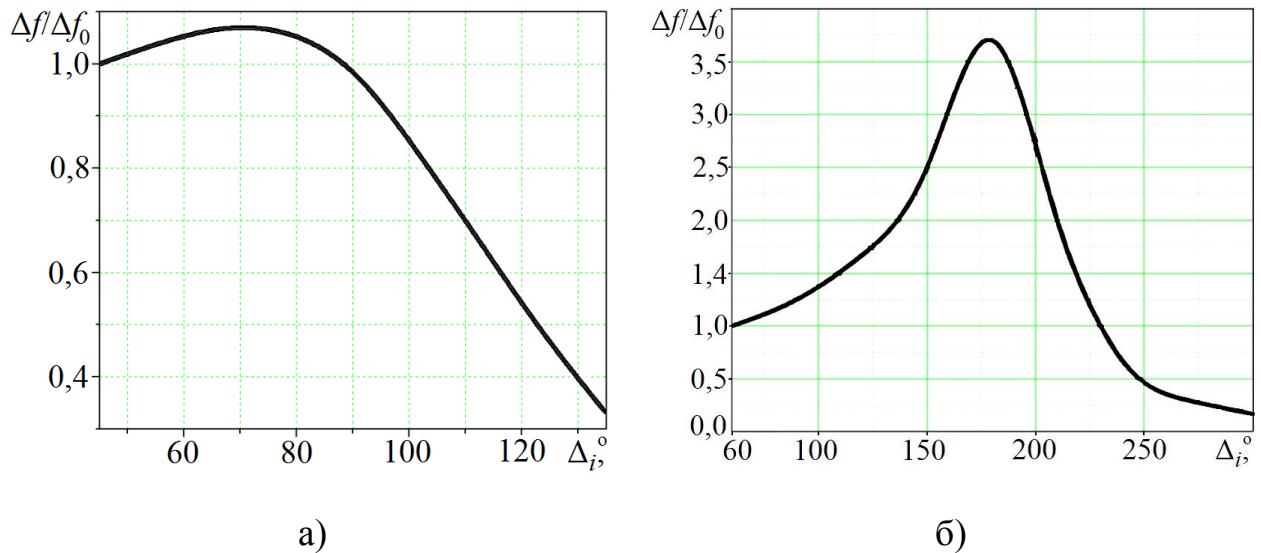


Рисунок 8 – Залежність відношення ширини робочої смуги чвертьхвильової ДФС (а) та напівхвильової ДФС (б), до ширини робочої смуги відповідних одиночних ДФС від величини диференційного зсуву фаз, що створюється кожним ЕПП

З наведених залежностей випливає, що ширина робочої смуги частот чвертьхвильової ДФС, що перестроюється, в інтервалі $\Delta=45^\circ-90^\circ$ не поступається, а навіть дещо перевищує ширину робочої смуги частот звичайної ДФС. Ширина робочої смуги частот напівхвильової ДФС, що перестроюється, значно перевищує робочу смугу частот звичайної напівхвильової ДФС, досягаючи максимуму при $\Delta_i=180^\circ$ і $\varphi=60^\circ$. Це пов'язано з малою крутизною залежності кута розвороту середньої секції φ і положення ефективної площини анізотропії ψ від Δ , що еквівалентно залежності від частоти. Таким чином, дана ДФС є широкосмуговою в порівнянні з одиночною ДФС.

Оскільки половина напівхвильової ДФС є чвертьхвильовою ДФС, логічно припустити, що комбінація напівхвильового і чвертьхвильового ЕПП, розгорнутих на кут $\varphi=60^\circ$, утворює також широкосмугову чвертьхвильову ДФС (перетворювач лінійної поляризації в кругову). Проведений розгляд чвертьхвильової ДФС, що складається з 180° ЕПП і 90° ЕПП, показав, що перетворення лінійно-поляризованої хвилі в кругополяризовану хвилю відбувається в широкій смузі частот тільки в разі, коли лінійно-поляризована хвиля надходить з боку 180° ЕПП. Смуга робочих частот такої чвертьхвильової ДФС аналогічна смузі робочих частот

напівхвильової широкосмугової ДФС. При подачі хвилі з боку 90° ЕПП ширина робочої смуги, в порівнянні зі звичайною ДФС, навпаки, звужується.

Робоча смуга частот чвертьхвильових і напівхвильових широкосмугових ДФС може бути ще більш розширена шляхом зменшення кута розвороту осей анізотропії φ . У цьому випадку відсутність паразитного крос-поляризованого сигналу на виході ДФС спостерігається на частотах, симетрично рознесених відносно центральної. Зменшення кута φ має бути таким, щоб це не призвело до погіршення параметрів ДФС нижче допустимого рівня в діапазоні, обмеженому цими частотами.

Частотні залежності амплітуди паразитного сигналу на виході широкосмугових ДФС в полі лінійно поляризованої хвилі для різних кутів розвороту представлені на рис. 9, а. Паразитна складова на виході напівхвильової ДФС, що працює в полі кругової поляризації, на центральній частоті залишається рівною нулю при будь-якому розвороті середньої секції (рис. 9, б). При цьому її рівень нижче у всій смузі робочих частот. Остання обставина надзвичайно важлива при використанні ДФС в фазових зсувувачах частоти, оскільки від цього безпосередньо залежить рівень паразитного спектру вихідного сигналу.

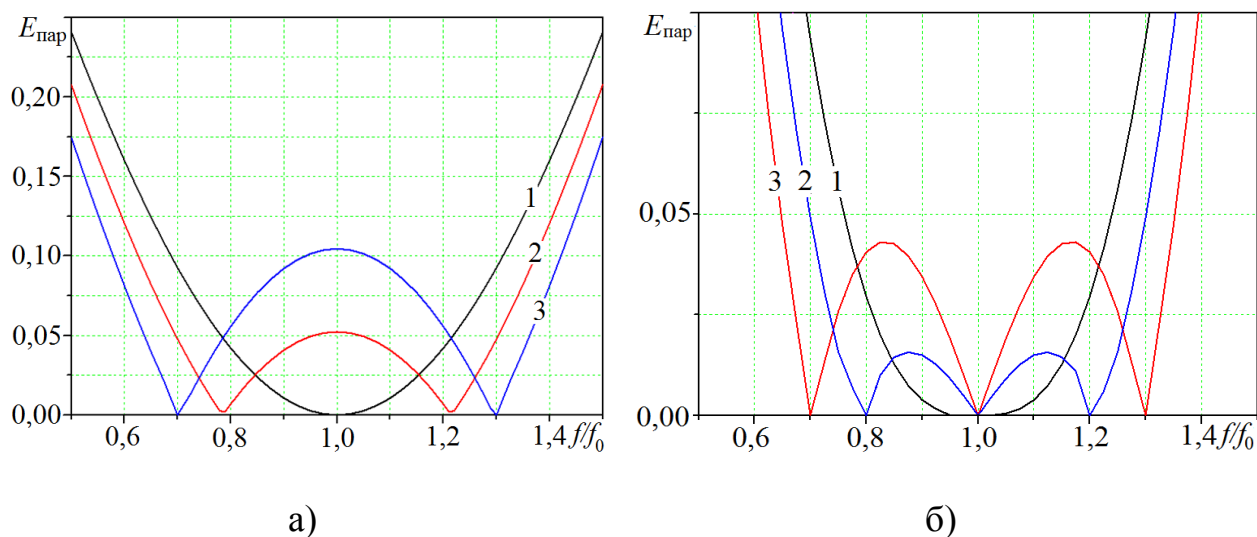


Рисунок 9 – Частотні залежності амплітуди паразитної крос-поляризованої хвилі на виході: а) широкосмугових ДФС, що працюють в полі лінійно-поляризованої хвилі; б) широкосмугової напівхвильової ДФС, що працює в полі круго-поляризованої хвилі при кутах, розвороту ЕПП: $\varphi = 60^\circ$ (крива 1), $\varphi = 58^\circ$ (крива 2) і $\varphi = 56^\circ$ (крива 3)

Достовірність проведених теоретичних досліджень підтверджена експериментом в діапазоні 0,086–0,225 ТГц.

У розділі 5 розглядається практичне застосування запропонованих широкосмугових ДФС в квазіоптичних поляризаційних пристроях.

За результатами досліджень, проведених в розділах 2 і 3, було обрано матеріали, спосіб узгодження і конструкцію структури з подвійним променезаломленням для роботи в довгохвильовій частині ТГц діапазону

частот (0,1 – 0,2 ТГц). З точки зору забезпечення мінімального загасання сигналу, технологічності виготовлення структури і доступності матеріалів найбільш доцільним є комбінація тефлону ($\epsilon=2,07$, $\text{tg}\delta=10^{-4}$) і слюди ($\epsilon=6,9$, $\text{tg}\delta=10^{-3}$). Був обраний «анізотропний» спосіб узгодження за допомогою виступаючих за поверхню структури пластин тефлону. Період структури був обраний рівним 0,4 мм ($((t_1 + t_2) / \lambda = 0,2)$) при коефіцієнті заповнення слюдою $F=0,26$. Конструктивно окремі ЕПП на основі такої структури виконувалися у вигляді касети з зовнішнім діаметром 35 мм. З використанням таких ЕПП на основі ПДП діаметром 20 мм було реалізовано два види широкосмугових обертачів площини поляризації (ОПП) лінійно поляризованого коливання для застосування в схемі еліпсометра (без додаткової поляризуючої ґратки і з додатковою поляризуючою ґраткою), основним вузлом яких є широкосмугова напівхвильова ДФС, що складається з трьох ЕПП, розгорнутих на кут 58° .

Експериментальне дослідження обох типів ОПП в діапазоні 0,11 – 0,225 ТГц представлено на рис. 10.

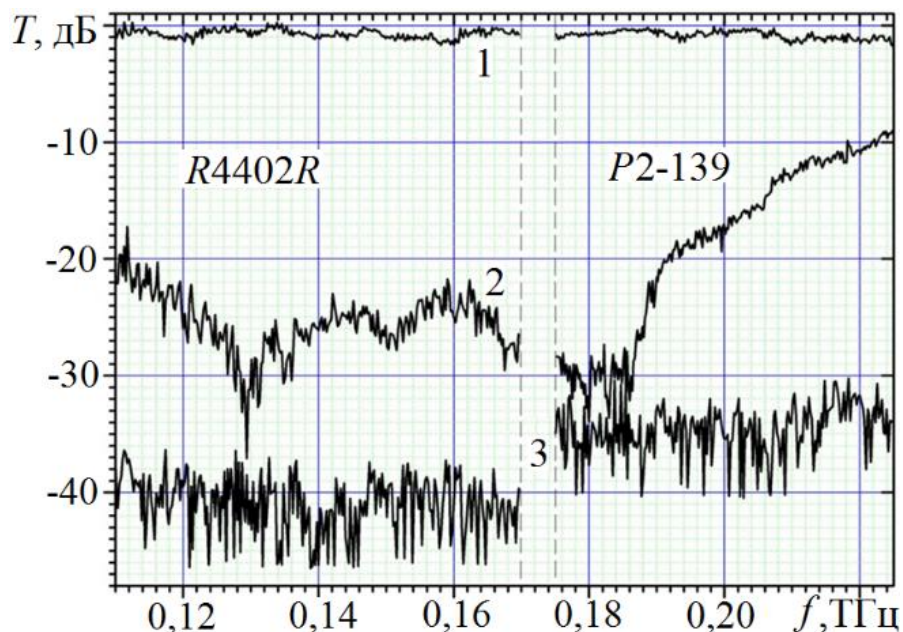


Рисунок 10 – Частотні залежності коефіцієнта передачі основної складової (крива 1) і коефіцієнтів передачі паразитної складової на виході ОПП без додаткової поляризуючої ґратки (крива 2) і при наявності поляризуючої ґратки (крива 3)

Також було здійснено широкосмуговий поляризаційний фазообертач, в якому напівхвильова широкосмугова ДФС обертається в полі хвилі з круговою поляризацією між двома чвертьхвильовими широкосмуговими ДФС. Введений таким фазообертачем фазовий зсув θ однозначно пов'язаний з кутом θ повороту напівхвильової фазової секції ($\theta = 2\psi$).

Результати експериментального дослідження широкосмугового поляризаційного фазообертача, що наведено на рис. 11, показали їх високу ефективність при роботі в обраному діапазоні частот.

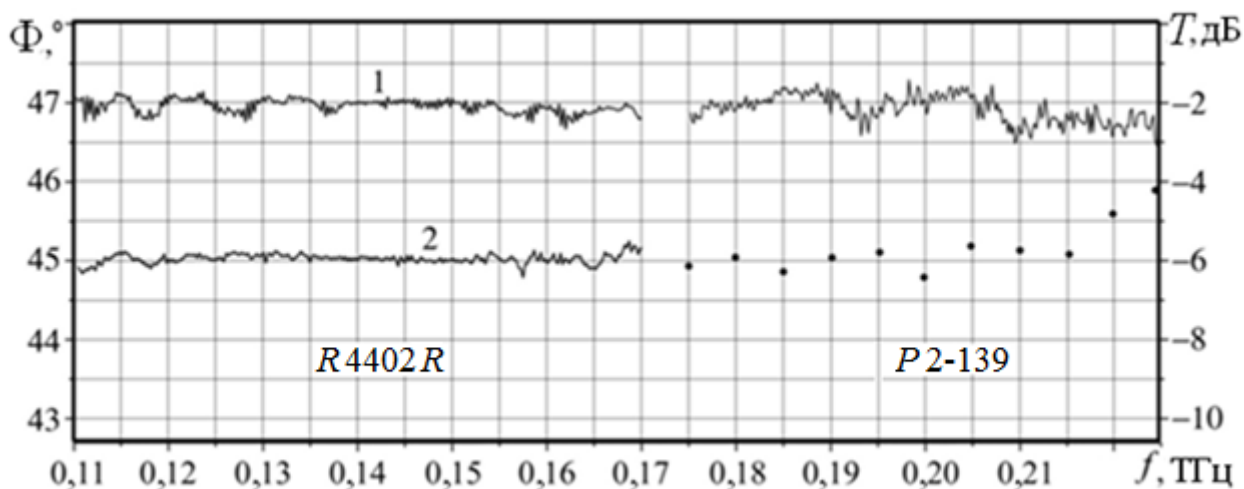


Рисунок 11 – Частотні залежності коефіцієнту передачі фазообертача (1) і зсуву фази в 45° , що вводиться ним (2)

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено рішення актуальної задачі радіофізики, пов'язаної з встановленням фізичних закономірностей і особливостей взаємодії електромагнітних хвиль з квазіоптичними поляризаційними перетворювачами на основі штучних структур з подвійним променезаломленням в ТГц діапазоні частот. Задача вирішена на підставі теоретичних і експериментальних досліджень фізичних процесів в квазіоптичних лініях передачі класу «порожнистий діелектричний хвилевід», до складу яких включені анізотропні структури. Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці науково-технічної основи для створення квазіоптичних перетворювачів поляризації в ТГц діапазоні частот, які знайдуть застосування при вивченні фізичних процесів взаємодії електромагнітних хвиль з електродинамічними структурами, матеріалами і середовищами.

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Методом інтегральних функціоналів в частотній області для багатомодової задачі розсіювання розраховані залежності показників подвійного променезаломлення від частоти для запропонованих структур полістирол–повітря і слюда–лавсан. Встановлено, що вищі дифракційні гармоніки будуть по-різному впливати на коефіцієнт передачі через структуру з подвійним променезаломленням в залежності від поляризації падаючої хвилі. Показано, що при наявності відбиття на межі розділу середовищ залежність диференційного зсуву фаз $\Delta\varphi$ від h носить коливальний характер.

2. Вперше в ТГц діапазоні частот розроблені способи узгодження структур з властивістю подвійного променезаломлення форми за допомогою елементів самих структур. У першому способі узгодження здійснюється за допомогою виступання за поверхню структури пластин одного із діелектриків з поперечними пазами («ізотропне» узгодження). У другому способі узгодження здійснюється за допомогою виступання за поверхню структури пластин діелектрика з меншим показником діелектричної проникності без поперечних пазів («анізотропне» узгодження). Цей спосіб узгодження впливає на величину диференційного зсуву фаз, який створюється структурою. Експериментально для структури лавсан-тефлон на частоті $f_0=0,17$ ТГц при «ізотропному» способі узгодження отримано значення коефіцієнта відбиття $R_0 \leq 0,03$, а при «анізотропному» способі узгодження – $R_0 \approx 0,025$ для хвиль, поляризованих як паралельно, так і перпендикулярно пластинам. Основною перевагою «анізотропного» способу узгодження в порівнянні з «ізотропним» є можливість його використання в більш короткохвильовій частині ТГц діапазону.

3. Вперше досліджено чвертьхвильові і напівхвильові ДФС, що складаються з декількох ЕПП. Для реалізації чвертьхвильової ДФС, що перестроюється, досить двох однакових ЕПП, кожен з яких в діапазоні перестроювання створює диференційний зсув фаз від 45° до 135° . Налаштування секцій здійснюється розворотом осі анізотропії одного з ЕПП відносно іншого на кут від 0° до 45° . Напівхвильова ДФС, що перестроюється, може складатися з трьох однакових ЕПП, кожен з яких в діапазоні перестроювання створює диференційний зсув фаз від 60° до 300° . Налаштування ДФС здійснюється розворотом осі анізотропії середнього ЕПП відносно крайніх на кут від 0° до 60° .

4. Вперше було реалізовано ширококутні чвертьхвильові і напівхвильові ДФС. Ширококутна чвертьхвильова ДФС складається з двох ЕПП, що не перестроюються, які створюють на центральній частоті діапазону диференційні зсуви фаз 90° і 180° і повернутих на кут 58° – 60° . Причому 180° ЕПП розташовується з боку падіння лінійно-поляризованої хвилі. Ширококутна напівхвильова ДФС складається з трьох однакових ЕПП, що не перестроюються, кожен з яких створює на центральній частоті діапазону диференційні зсуви фаз 180° , а вісь анізотропії середнього ЕПП повернута на кут 58° – 60° відносно осей анізотропії крайніх. Ширина робочої смуги таких ДФС в кілька разів перевищує ширину робочої смуги окремого ЕПП.

5. Вперше запропоновано і реалізовано ширококутний обертач площини поляризації, що працює в діапазоні частот $0,11$ – $0,225$ ТГц. Як структура з подвійним променезаломленням для довгохвильової частини терагерцового діапазону використовується набір пластин слюди і тефлону з коефіцієнтом заповнення тефлоном $F=0,25$ і відносним періодом $0,2$. Дані, що отримані в результаті досліджень, дозволяють зробити висновок про можливість використання розробленого ОПП у еліпсометричних схемах.

6. Вперше розроблено та реалізовано макет поляризаційного фазообертача, що працює в діапазоні 0,11–0,17 ТГц. Показано, що застосування ширококутових диференційних фазових секцій дозволяє значно розширити робочу смугу роботи фазообертача при зменшенні його фазової похибки. В результаті проведених експериментальних досліджень макета показана принципова можливість використання ширококутового фазообертача в квазіоптичних радіовимірювальних схемах.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1 Косяк О. С. Дифференциальные фазовые секции на основе двулучепреломления формы в терагерцевом диапазоне частот / О. С. Косяк, В. И. Безбородов, Е. М. Кулешов, П. К. Нестеров // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т. 5(19), № 3. – С. 92 – 97.
- 2 Косяк О. С. Согласование структур с двулучепреломлением формы со свободным пространством в терагерцевом диапазоне частот / О. С. Косяк, В. И. Безбородов, Е. М. Кулешов, В. В. Ячин // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), № 2. – С. 83 – 89.
- 3 Косяк О. С. Перестраиваемые и широкополосные дифференциальные фазовые секции в терагерцевом диапазоне частот / О. С. Косяк, В. И. Безбородов, Е. М. Кулешов, П. К. Нестеров // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2016. – Т. 21, №4. – С. 318-329.
- 4 Косяк О. С. Вращатель плоскости поляризации для широкополосного эллипсометра терагерцевого диапазона / О. С. Косяк, В. И. Безбородов, И. К. Кузьмичев // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2017. – Т. 22, №1. – С. 78-85.
- 5 Kosiak O. S. Wideband Quasi-Optical Polarization Phase Shifter Operating in the THz Frequency Range / O. S. Kosiak, V. I. Bezborodov, P. K. Nesterov // Telecommunications and Radio Engineering. – 2017. – Vol.76, No 3. – P. 227-236.
- 6 Kosiak O. S. Differential Phase Sections Based on Form Birefringence Effect Operating in the Terahertz Frequency Range / V. I. Bezborodov, O. S. Kosiak, Ye. M. Kuleshov, V. V. Yachin // Proceedings of the 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2014), Gdańsk, Poland, June 16÷18 – 2014. – Vol.1, ISBN : 978-83-931525-2-0.
- 7 Kosiak O. S. Variable and broadband differential phase sections in the THz frequency range / O. S. Kosiak, V. I. Bezborodov, Ye. M. Kuleshov // Proceedings of the 21th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2016), Krakow, Poland, May 9÷11 – 2016; ISBN: 978-1-5090-2214-4
- 8 Kosiak O. S. Wideband quasi-optical polarization phase shifter operating in the THz frequency range / O.S. Kosiak, V.I. Bezborodov, P.K. Nesterov // Proceedings of the First Conference on Electrical and Computer Engineering (Ukrcon-2017), Kyiv, Ukraine, May 29 ÷ June 2 – 2017; ISBN: 978-966-304-207-7.

- 9 Kosiak O. S. Differential Phase Sections Based on Form Birefringence in the Terahertz Frequency Range / O. S. Kosiak, V. I. Bezborodov, Ye. M. Kuleshov, V. V. Yachin // 14th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, October 14-17, 2014 / O. Ya. Usikov IRE NASU (Kharkiv, Ukraine).
- 10 Kosiak O. S. Matching the Differential Phase Sections Based On Form Birefringence Effect with Free Space in the Terahertz Frequency Range / O. S. Kosiak, V. I. Bezborodov, Ye. M. Kuleshov, V. V. Yachin // International Young Scientists Forum on Applied Physics, September 29 - October 2, 2015 / Dnipropetrovsk, Ukraine.

АНОТАЦІЯ

Косяк О. С. Квазіоптичні поляризаційні перетворювачі терагерцового діапазону. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, м. Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню квазіоптичних перетворювачів поляризації ТГц діапазону частот, заснованих на ефекті подвійного променезаломлення форми.

Розглянуто фізичні процеси взаємодії електромагнітних хвиль зі штучними структурами з подвійним променезаломленням форми. Створені та досліджені структури в ТГц діапазоні частот. За допомогою чисельного методу інтегральних функціоналів в частотній області для багатомодової задачі розсіювання розглянуто поведінку структури з подвійним променезаломленням при кінцевій товщині пластин. Проведено порівняння з розглянутою М. Борном аналогічною структурою при товщині пластин значно меншою за довжину хвилі. Зроблено висновки про межі застосування аналітичних виразів М. Борна.

На підставі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень запропоновані способи узгодження структур з подвійним променезаломленням форми з квазіоптичним трактом за допомогою елементів власно структур. Розглянуто два види такого узгодження: «анізотропне» узгодження, що здійснюється за допомогою виступання пластин одного з діелектриків над поверхнею структури та «ізотропне» узгодження, яке відрізняється тим, що в виступаючому діелектрику прорізані пази. Показано, що «анізотропний» спосіб узгодження, кілька поступаючись по смуговим властивостям і ступеню узгодження «ізотропному» є більш прийнятним в ТГц діапазоні частот.

Теоретично і експериментально в ТГц діапазоні досліджені диференційні фазові секції, що перестроюються, які складаються з декількох елементів з подвійним променезаломленням, що не перестроюються.

Показано, що для реалізації чвертьхвильової ДФС достатньо двох ЕПП, оптичні осі яких розгорнуті на деякий кут. Напівхвильова ДФС, що перестроюється може складатися з трьох однакових ЕПП, оптична вісь середнього з яких розгорнута відносно оптичних осей крайніх.

Теоретично і експериментально в ТГц діапазоні частот досліджені ширококутові ДФС. Ширококутова чвертьхвильова ДФС представляє собою послідовне з'єднання 90° і 180° ЕПП, оптичні осі яких повернуто на кут близько 60° . Ширококутова напівхвильова ДФС складається з трьох однакових 180° ЕПП, оптичну вісь середнього з яких повернуто на кут близько 60° .

На основі проведених в дисертаційній роботі досліджень для довгохвильової ділянки ТГц діапазону запропонована структура з подвійним променезаломленням, що складається з пластин тефлону і слюди, узгоджена з квазіоптичного трактом «анізотропним» способом. На базі такої структури реалізовані і експериментально досліджені ширококутовий обертач площини поляризації для квазіоптичного еліпсометра і поляризаційний фазообертач, які працюють в смузі частот 0,11–0,225 ТГц.

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

АННОТАЦИЯ

Косяк О. С. Квазиоптические поляризационные преобразователи терагерцового диапазона. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена исследованию квазиоптических преобразователей поляризации ТГц диапазона частот, основанных на эффекте двулучепреломления формы.

Рассмотрены физические процессы взаимодействия электромагнитных волн с искусственными двулучепреломляющими структурами. Созданы и исследованы структуры в ТГц диапазоне частот. На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований при помощи численного метода интегральных функционалов в частотной области для многомодовой задачи рассеяния рассмотрено поведение двулучепреломляющей структуры при конечной толщине пластин. Проведено сравнение с рассмотренной М. Борном аналогичной структурой при толщине пластин значительно меньше длины волны. Сделаны выводы о границах применимости аналитических выражений М. Борна. Созданы и исследованы структуры в ТГц диапазоне частот.

На основании теоретического анализа и экспериментальных исследований предложены способы согласования структур, обладающих

двулучепреломлением формы, с квазиоптическим трактом при помощи элементов самих структур. Рассмотрено два вида такого согласования: «анизотропное» согласование, осуществляемое выступанием пластин одного из диэлектриков над поверхностью структуры и «изотропное» согласование, отличающееся тем, что в выступающем диэлектрике прорезаны пазы. Показано, что «анизотропный» способ согласования, несколько уступая по полосовым свойствам и степени согласования «изотропному» является более предпочтительным в ТГц диапазоне частот.

Теоретически и экспериментально рассмотрена возможность создания в ТГц диапазоне частот перестраиваемых ДФС, на основе неперестраиваемых элементов, обладающих свойством двулучепреломления формы. Показано, что для реализации перестраиваемой четвертьволновой ДФС достаточно двух ДЭ, оптические оси которых развернуты на некоторый угол. Перестраиваемая полуволновая ДФС может состоять из трех одинаковых ДЭ, оптическая ось среднего из которых развернута относительно оптических осей крайних.

Теоретически и экспериментально в ТГц диапазоне частот исследованы широкополосные ДФС. Широкополосная четвертьволновая ДФС представляет собой последовательное соединение 90° и 180° ДЭ, оптические оси которых развернуты на угол около 60° . Широкополосная полуволновая ДФС состоит из трех одинаковых 180° ДЭ, оптическая ось среднего из которых развернута на угол около 60° .

На основании проведенных в диссертационной работе исследований для длинноволновой части ТГц диапазона предложена двулучепреломляющая структура, состоящая из пластин тефлона и слюды, согласованная с квазиоптическим трактом «анизотропным» способом. На базе такой структуры реализованы и экспериментально исследованы широкополосный вращатель плоскости поляризации для квазиоптического эллисометра и поляризационный фазовращатель, работающие в полосе частот 0,11–0,225 ТГц.

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

ABSTRACT

Kosiak O. S. Quasioptical polarization converters of terahertz range. – The manuscript.

Thesis for a candidate degree by speciality 01.04.03 – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS Ukraine. Kharkiv, 2017.

The thesis is devoted to the investigation of quasi-optical polarization converters of the terahertz frequency range based on the form birefringence effect.

The physical processes of interaction of electromagnetic waves with artificial birefringent structures are considered. The structures in THz frequency range are created and investigated. The behavior of the birefringent structure with

a finite plate thickness is considered using the numerical method of integral functional in the frequency domain for full-wave scattering problem. The comparison with the analogous structure having plate thickness much smaller than the wavelength investigated by M. Born is carried out. The conclusions about the limits of the applicability of M. Born's analytical expressions are made.

On the basis of theoretical analysis and experimental studies, the methods for the matching the birefringent structures to a quasi-optical path by using elements of the birefringent structures are proposed. Two types of such a matching are considered: "anisotropic" matching, performed by protruding the plates of one of the dielectrics above the structure surface and "isotropic" matching, characterized by the fact that grooves are cut in the protruding dielectric. It is shown that the "anisotropic" matching method which is slightly inferior in the band-pass properties and the degree of matching to "isotropic" one is more preferable in the THz frequency range.

Possibility of creating a configurable DPS based on non-configurable elements possessing the form birefringence property in the THz frequency range is considered theoretically and experimentally. It is shown that two BEs, the optical axes of which are turned at some angle, are sufficient for implementing a tunable quarter-wave DPS. The tunable half-wave DPS can consist of three identical BEs, the optical axes of the middle one of which is turned with respect to the optical axes of the outside left and outside right BEs.

The broadband DPS in the THz frequency range is studied theoretically and experimentally. Broadband quarter-wave DPS is a serial connection of 90° and 180° BEs, the optical axes of which are turned at an angle of about 60° . The broadband half-wave DPS consists of three identical 180° BEs, the optical axis of the middle one is turned at an angle of about 60° .

Based on the studies considered in the thesis for the long-wave part of the THz frequency range the birefringent structure consisting of Teflon and mica plates, matched to the quasi-optical path using "anisotropic" way, is proposed. Based on this structure a broadband rotator of the polarization plane for a quasioptical ellipsometer and a polarization phase shifter operating in the 0.11-0.225 THz frequency band are realized and experimentally investigated.

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