

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Косяка Олега Сергійовича  
"Квазіоптичні поляризаційні перетворювачі терагерцового діапазону",  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – "радіофізика"

### **1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.**

Важливим етапом освоєння будь-якого нового діапазону електромагнітного спектра, що забезпечує зростання якості експериментальних результатів, є розробка нових елементів для управління випромінюванням. Оскільки терагерцовий діапазон лежить між областями електроніки та фотоніки, в ньому виявляється можливим використовувати методи генерації випромінювання, характерні для обох спектральних інтервалів. Надзвичайно важлива особливість ТГц діапазону хвиль полягає в можливості і доцільності використання принципів і методів квазіоптики, що дозволяють поєднувати хвильовий і оптичний підходи при розробці методів і засобів вимірювання параметрів радіохвиль і радіоланцюгів в цьому діапазоні. Важливою перевагою квазіоптики при створенні радіовимірювальних засобів в терагерцовому діапазоні є можливість широкого використання поляризаційних принципів і методів перетворення хвильових пучків. Застосування поляризаційних принципів дозволяє різко підвищити інформативність вимірювальних сигналів і, крім того, дає можливість в ряді випадків істотно поліпшити технічні параметри приладів і пристроїв, підвищити чутливість і точність вимірювань, а також значно розширити сферу застосування квазіоптичних радіовимірювальних методів і засобів в ТГц діапазоні хвиль. Однак, в даний час процес подальшого освоєння терагерцового діапазону стримує недостатньо повне уявлення про фізику роботи квазіоптичних поляризаційних перетворювачів і відсутність практичних методичних рекомендацій щодо їх виготовлення. Невирішеними залишаються питання оптимізації зосередженого зв'язку квазіоптичних поляризаційних перетворювачів з зовнішніми трактами.

Усі завдання дисертації спрямовано на вирішення важливої наукової задачі – встановлення фізичних закономірностей і особливостей взаємодії електромагнітних хвиль з квазіоптичними поляризаційними перетворювачами на основі штучних структур з подвійним променезаломленням в ТГц діапазоні частот. Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Косяка О.С. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність, наукову та практичну значимість дисертації переконливо свідчить і те, що вона виконувалася в рамках 2 держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О.Я.Усикова НАН України.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, представляються досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано і переконливо. Дисертація Косяка О.С. складається зі вступу, що містить загальну характеристику роботи, п'яти розділів основного тексту, висновків до роботи і списку використаних джерел.

**У першому розділі** проведено огляд літератури по лініях передачі випромінювання та субхвильовим структурам, які застосовуються при створенні поляризаційних пристроїв в терагерцевому діапазоні. Розглянуто теоретичні та експериментальні методи досліджень структур з подвійним променезаломленням. Зроблено висновок про необхідність застосування порожнистих діелектричних і металодіелектричних хвилеводів як трактів для створення поляризаційних пристроїв. Запропоновано використовувати структури з штучним подвійним променезаломленням для побудови квазіоптичних перетворювачів поляризації в ТГц діапазоні частот.

**У другому розділі** наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень запропонованих автором окремих диференціальних фазових секцій на основі структур з подвійним променезаломленням. Методом інтегральних функціоналів в частотній області для багатомодової задачі розсіювання розраховані залежності показників подвійного променезаломлення від частоти для структур полістирол-повітря і слюда-лавсан при їх періодах, порівнянними з довжиною хвилі випромінювання. Відзначено можливість розрахунку таких структур за спрощеними аналітичними виразами при відношенні періоду структури до довжини хвилі  $< 0,2$ . Показано коливальний характер залежності диференціальних зсувів фаз запропонованих структур з подвійним променезаломленням від їх відносної довжини. Вивчено вплив вищих дифракційних гармонік на коефіцієнт передачі в залежності від поляризації випромінювання. Отримано гарний збіг експериментальних і розрахункових диференціальних фазових зсувів для запропонованих структур.

**У третьому розділі** на підставі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень запропоновано два нових засоби узгодження окремих диференціальних фазових секцій з подвійним променезаломленням форми, з квазіоптичним трактом за допомогою елементів самих структур. Узгодження здійснене за допомогою виступів пластин одного з діелектриків з поперечними пазами за поверхню структури ( "ізоτροпне" узгодження) і за допомогою виступів пластин без пазів («анізотропне» узгодження). Для структури лавсан-тефлон на центральній частоті  $f_0 = 0,17$  ТГц для ТЕ і ТМ хвиль вдалося експериментально отримати коефіцієнт відбиття  $R_0 \leq 0,03$ . Показана перспективність застосування «анізотропного» засобу узгодження в короткохвильовій частини ТГц діапазону.

**У четвертому розділі** дисертації з використанням методу поляризаційних матриць розсіювання встановлена і підтверджена експериментально можливість реалізації чвертьхвильових і напівхвильових диференціальних фазових секцій,

які переналагоджуються на основі двох і трьох непереналагоджуваних елементів з подвійним променезаломленням, які забезпечують фазовий зсув в діапазоні  $45^\circ$  –  $300^\circ$  в діапазоні довжин хвиль 1,3 – 3,5 мм. На основі аналогічних окремих елементів з подвійним променезаломленням форми, теоретично і експериментально показана можливість реалізації ширококутових чвертьхвильових і напівхвильових диференціальних фазових секцій.

У п'ятому розділі з використанням "анізотропного" засобу узгодження на основі ширококутової напівхвильової диференціальної фазової секції з елементів з подвійним променезаломленням розроблено та реалізовано ширококутовий обертач площини поляризації, що працює в діапазоні частот 0,11 –

0,23 ТГц. На основі ширококутової напівхвильової диференціальної фазової секції, розташованої між двома ширококутовими чвертьхвильовими секціями розроблено та реалізовано фазообертач, що працює в діапазоні 0,11 – 0,17 ТГц. Показано, що застосування ширококутових диференціальних фазових секцій дозволяє більш ніж в два рази розширити робочу смугу роботи фазообертача при зменшенні його фазової похибки.

### **3. Достовірність та наукова новизна отриманих результатів.**

Достовірність і обґрунтованість результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в даній дисертаційній роботі, не викликає сумнівів і визначається коректністю постановки задач, а також тим, що при їх отриманні використовувалися всебічно апробовані експериментальні стандартні хвильові і оригінальні квазіоптичні методи вимірювань амплітудно-фазових і поляризаційних характеристик електромагнітних полів, розсіяних на електродинамічних структурах. Основні експериментальні результати, отримані дисертантом, добре узгоджуються з даними, отриманими ним шляхом математичного моделювання. Обґрунтованість і достовірність теоретичних результатів забезпечена використанням відомих математичних і обчислювальних моделей, коректністю прийнятих допущень, збіжністю обчислювальних процесів в шуканих рішеннях.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно впливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору й рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

До результатів, які мають наукову новизну, можна віднести такі:

1. Теоретичне і експериментальне дослідження структур з подвійним променезаломленням в терагерцевому діапазоні при їх кінцевій товщині. Демонстрація коливального характеру залежності диференціальних зсувів фаз запропонованих структур від їх відносної довжини, вплив на них вищих дифракційних гармонік.

2. Експериментальна реалізація двох засобів узгодження структур з подвійним променезаломленням форми, з квазіоптичним трактом за допомогою елементів самих структур.

3. Експериментальне дослідження ширококутових чвертьхвильових і напівхвильових диференціальних фазових секцій, що перестроюються на основі структур з подвійним променезаломленням.

4. Експериментальна реалізація ширококутового обертача площини поляризації для квазіоптичного еліпсометра і поляризаційного фазообертача, що працюють в діапазоні частот 0,11 – 0,23 ТГц.

#### **4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів в публікаціях.**

Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристика яких наведена в пунктах 1-4, дозволяє зробити висновок про їх внутрішню єдність і визначити особистий внесок автора в науку. Він полягає в тому, що здобувач запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуальної задачі радіофізики, який полягає у встановленні 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.

Зауважимо, що дана робота має серйозний потенціал для подальшого розвитку. Тому є досить актуальним, використовуючи запропоновані в роботі методи і підходи, вивчити можливості реалізації за допомогою сучасних нанотехнологій (наприклад, 3D-нанопечать) перетворювачів поляризації на основі ефекту двулучепреломлення форми в більш короткохвильовій частині ТГц діапазону частот.

Дисертація написана цілком зрозуміло й грамотно, науково-технічна термінологія використовується достатньо коректно, структура роботи є логічною.

Основні результати опубліковані в 5 статтях у профільних наукових виданнях, одна з яких опублікована в рейтинговому міжнародному журналі. Основні положення дисертації пройшли апробацію на 5 міжнародних наукових конференціях, а також на наукових семінарах. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автореферату відповідає тексту дисертації.

#### **5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування.**

Наукова і практична значимість результатів дисертаційної роботи Косяка О.С. полягає в тому, що отримані в ній теоретичні і експериментальні результати дозволяють розширити фізичні уявлення про взаємодію електромагнітного терагерцового випромінювання з структурами з подвійним променезаломленням. У ній розроблена науково-технічна основа для створення квазіоптичних перетворювачів поляризації в ТГц діапазоні частот. Результати досліджень автора можуть знайти застосування при створенні еліпсометрів ТГц діапазону.

частот, при створенні мікрокомпактних полігонів, при створенні фазообертачів і зсувачів частоти ТГц діапазону частот. Надалі результати роботи можуть бути використані при розробці квазіоптичних радіовимірювальних приладів і компонентів систем загального і спеціального застосування.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області обчислювальної електродинаміки, квантової радіофізики, оптоелектроніки та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

### **6. Недоліки та зауваження.**

Дисертаційна робота Косяка О.С. не вільна від недоліків.

1. У першому розділі проведено огляд літератури, присвяченої дослідженню можливостей застосування анізотропних структур для створення поляризаційних перетворювачів в терагерцевому діапазоні, але досить в конспективній формі. Бажано було б провести більш детальний і ґрунтовний огляд цих досліджень.

У розділі 2 автор не наводить обґрунтування умови (ф. 2.18) відсутності вищих дифракційних гармонік при взаємодії електромагнітного випромінювання з двоприменезаломлюючими структурами. У таблиці 2.1 для повноти дослідження варто було б привести розрахункові дані по дослідженню чвертьхвильових диференціальних фазових секцій. З рис. 2.7 незрозуміло значення відносного показника двоприменезаломлення  $\Delta n$ , а в тексті дисертації це значення автором не розшифроване.

У розділі 3 відсутнє обґрунтування вибору діелектричної проникності узгоджувального шару (ф. 3.2).

У розділі 5 доцільно було б провести порівняння характеристик розроблених автором обертачів площини поляризації і фазообертача з характеристиками сучасних поляризаційних перетворювачів.

При описі заломлюючих характеристик анізотропних структур (рис.2.3, рис. 3.1) відсутні дані про параметри обраних матеріалів, що ускладнює їх аналіз.

При аналізі експериментальних даних в розділах 2-4 дисертаційної роботи не зазначена величина похибки вимірювань.

Дисертація не вільна від технічних огріхів. На рис. 3.6 залежності показників заломлення від коефіцієнта заповнення позначені цифрами 1, 2, а в підписі до рисунку вони позначені буквами а, б.

Занадто велике число абревіатур ускладнює сприйняття матеріалу.

### **7. Загальні висновки**

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи та не стосуються принципів результатів і висновків дисертації. Детальний аналіз дає змогу зробити висновок, що подана до захисту робота є завершеним дослідженням та містить важливі наукові результати.

Здобувач виконав великий обсяг цікавих і актуальних досліджень, запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуального завдання радіофізики, який полягає у встановленні

зонах хвиль.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Косяка О.С. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно подані на конференціях і симпозиумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Вважаю, що за актуальністю, обсягом та новизною рецензована дисертаційна робота “ Квазіоптичні поляризаційні перетворювачі терагерцового діапазону ” відповідає вимогам, зазначених у п. 11 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Косяк Олег Сергійович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.03 – радіофізика

Офіційний опонент  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри квантової радіофізики  
Харківського національного університету  
імені В. Н. Каразіна



В. О. Маслов

14 грудня 2017 року

