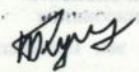


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

На правах рукопису
УДК 537.87:621.372.8



КУШТА Тарас Михайлович

**КВАЗІОПТИЧНІ СТРУКТУРИ ТИПУ КРУГЛИЙ ПОРОЖНИСТИЙ
ДИЕЛЕКТРИЧНИЙ ХВИЛЕВІД В ЗАДАЧАХ ФІЗИЧНОГО
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА
СУБМІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ**

01.04.03 - радіофізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1996

ЛНУ ім. В.Стефаника
АН України



00753865 (Y)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті радіо

Національної Академії Наук України, м. Харків.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник КІСЕЛЬОВ В. К.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор, зав. кафедрою фізики Харківської державної академії міського господарства ВІНОГРАДОВ С. С. ;
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник., зав. відділом ІРЕ НАН України БУЛГАКОВ Б.М.

Провідна організація: Харківський державний університет, кафедра антен та поширення радіохвиль та кафедра квантової радіофізики

Захист відбудеться 3 грудня 1996 р. о 12 годині на засіданні Спеціалізованої Ради Д 02.29.01 в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 310085, м. Харків вул. Акад. Проскури, 12, ІРЕ НАН України, конференцзал.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотечі ІРЕ НАН України, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

Автореферат розіслано " 30 " жовтня 1996 г.

В.о. Вченого секретаря
Спеціалізованої Ради
доктор фізико-математичних наук

Ю.К. Сіренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вивчення взаємодії субміліметрових електромагнітних хвиль з фізичними об'єктами є актуальним для сучасної науки. Крім самостійного інтересу, такі дослідження дозволяють, згідно принципу масштабного моделювання, досліджувати явища розсіяння на фізичних об'єктах електромагнітних хвиль інших діапазонів. Зокрема, з одного боку, розсіяння випромінювання субміліметрового діапазону є важливим аналоговою методикою дослідження розсіяння електромагнітних хвиль надвисоких частот радіолокаційними об'єктами, а, з другого боку, цей діапазон дає можливість вивчати і розсіяння більш коротких хвиль, наприклад, видимого світла окремими частками, використовуючи більш великі частки тієї ж форми. При цьому в субміліметровому діапазоні можна створювати дуже компактні лабораторні системи, забезпечуючі високу точність вимірювань.

Однак, при створенні лабораторних систем для дослідження характеристик розсіяння у вказаному діапазоні довжин хвиль виникає ряд істотних труднощів, зокрема, до них відносяться такі проблеми:

- формування плоскої однорідної електромагнітної хвилі в межах вимірювального об'єму;
- створення умов, при яких в прийомному випромінюванні, що несе інформацію про характеристики розсіяння об'єкта, вклад від побічних випромінювань, викликаних присутністю сторонніх предметів, достатньо малий.

Особливо великі труднощі виникають при дослідженні характеристик розсіяння об'єктів, які мають мале відбиття при порівняно великих розмірах по відношенню до довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

Існують різні способи вирішення вказаних проблем в надвисокочастотному та крайвисокочастотному діапазонах хвиль. Проте, використання їх в субміліметровому діапазоні хвиль неможливе за рядом причин фізичного та технологічного порядку. Таким чином, з одного боку, просте перенесення відомих методів, які використовуються для вимірювання характеристик розсіяння на більш довгих хвилях, стає неприйнятним в субміліметровому діапазоні, а, з другого боку, потреби науки та практики вимагають пошуку нових шляхів створення лабораторних систем субміліметрового діапазону для вимірювання характеристик розсіювання різноманітних об'єктів.

В субміліметровому діапазоні хвиль знайшли застосування квазіоптичні хвилеведучі структури типу порожнистий діелектричний хвилевід (ПДХ). Лінії передачі вказаного типу мають ряд цінних якостей, що дозволило зробити висновок про можливість їхнього нетрадиційного використання, а саме - побудову

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

на їхній основі своєрідних мікробеззехових камер для фізичного електродинамічного моделювання на субміліметрових хвилях. Особливо вдалою структурою з цієї точки зору виявився ПДХ у вигляді круглого каналу у діелектрику з втратами [1]. Однак, для використання ПДХ в цій новій якості необхідно перш за все виробити фізично обґрунтовані критерії використання такого підходу, а також провести деякі числові та дослідні оцінки основних параметрів таких структур з використанням як математичного апарату та методів теоретичної електродинаміки, так і експериментальної техніки.

Дисертаційна робота виконана у відділі квазіоптичної радіометрики ІРЕ НАН України у відповідності з планом науково-дослідних робіт Інститута в рамках держбюджетних НДР "Острів" - "Дослідження методів створення квазіоптичних вимірювальних пристроїв та систем з модуляційним перетворюванням частоти міліметрового та субміліметрового діапазонів хвиль" (№ держ. реєстрації 01. 87.0 067836) та НДР "Вікно" - "Дослідження методів створення квазіоптичних пристроїв та систем для вивчення пропускання, відбиття та розсіяння середовищ та структур у субміліметровому діапазоні радіохвиль" (№ держ. реєстрації 01.9.20.000604).

За результатами роботи автор був удостоєний Стипендії НАН України для молодих учених.

Мета роботи і задачі дослідження. Основною ціллю дисертаційної роботи є електродинамічні властивості регулярних та нерегулярних квазіоптичних структур типу ПДХ, які необхідні для створення компактних лабораторних систем фізичного електродинамічного моделювання характеристик розсіяння об'єктів на субміліметрових хвилях. Вказана мета передбачає вирішення таких задач:

- фізичне обґрунтування можливості вимірювання енергетичних характеристик розсіяння об'єктів, розташованих всередині ПДХ, адекватних характеристикам розсіяння об'єктів у вільному просторі в полі плоскої однорідної хвилі;
- отримання числових оцінок параметрів вимірювальної області;
- розробка експериментальної установки та методики вимірювань;
- теоретичне та експериментальне вивчення енергетичних характеристик розсіяння еталонного об'єкту (типу сфера) в круглому ПДХ та їх порівняння з відповідними характеристиками цього об'єкту у вільному просторі;
- розробка розрахункового інструмента для аналізу нерегулярних ПДХ з різними видами межових структур та його експериментальна перевірка.

Наукова новизна. У роботі вперше цілеспрямовано досліджені регулярні та нерегулярні ПДХ з точки зору можливості їх застосування для фізичного електродинамічного моделювання на субміліметрових хвилях, при якому ПДХ

використовується у нетрадиційній для себя якості, а саме - в ролі своєрідної мікро-безехової камери. При цьому вперше одержана така променева будова поля основної HE_{11} -моди круглого ПДХ, яка дозволила виділити область простору циліндричної форми навколо осі хвилевода, де існує тільки сімейство променів, які розповсюджуються паралельно осі хвилеводу та відповідають плоскій однорідній хвилі. Визначені енергетичні характеристики розсіюючого тіла, розташованого усередині ПДХ (переріз екстинкції, переріз зворотного розсіяння) адекватні відповідним характеристикам розсіяння плоских однорідних хвиль на фізичних тілах у вільному просторі.

Вперше теоретично та експериментально отримані енергетичні характеристики розсіяння ідеально провідної сфери усередині круглого ПДХ, а також визначені умови, при яких даний об'єкт може бути використаним в якості еталонного при дослідженні енергетичних характеристик розсіяння інших фізичних тіл, розташованих в ПДХ.

Запропоновано новий інструмент розрахунку квазіоптичних переходів, утворених різними видами межових структур. За допомогою даного розрахункового інструменту проведено аналіз квазіоптичних лінійних конусних переходів з двома видами межових структур: межа типу "діелектрик-діелектрик" та межа типу "шар діелектрика на металі". Показана можливість оптимізації розмірів квазіоптичних лінійних конусних переходів за мінімумом збудження найближчої до основної паразитної моди, а також отримано аналітичний вираз, зв'язуючий параметри переходу, за допомогою якого можна проводити таку оптимізацію. Експериментально досліджені електродинамічні властивості лінійних квазіоптичних переходів з чисто діелектричною межею.

Практична цінність. Одержані результати показують можливість створення компактних лабораторних систем субміліметрового діапазону електромагнітних хвиль на основі квазіоптичної хвилеводної структури типу круглий ПДХ для вимірювання енергетичних характеристик розсіяння фізичних об'єктів.

Теоретично та експериментально визначені енергетичні характеристики розсіяння об'єкта сферичної форми, у круглому ПДХ, який використовується як для перевірки точності моделювання характеристик розсіяння фізичних тіл, так і в якості еталонного об'єкта в конкретних лабораторних вимірювальних системах електродинамічного моделювання, в тому числі виконаних на основі ПДХ.

Запропоновано новий розрахунковий інструмент для дослідження електродинамічних властивостей плавних нерегулярностей ПДХ з різними видами межових структур, який може бути застосованим не тільки для ПДХ з повільно мінливим перерізом, але й для інших основних типів плавних нерегулярностей (наприклад, згинам цих хвилеводних структур).

Достовірність і обґрунтованість одержаних в роботі результатів обумовлюється: в теоретичній частині - застосуванням математично та фізично обґрунтованих методів і відповідністю розрахункових результатів даним експеримента, в експериментальній частині - регулярним відтворенням одержаних результатів.

Основні положення, що підлягають захисту:

1. Отримано нове променеве уявлення основної HE_{11} -моди квазіоптичної структури типу круглий порожнистий діелектричний хвилевід, при цьому:

1.1. Визначена область простору всередині ПДХ, де існує сімейство променів, які поширюються паралельно осі хвилевода і зображають плоску однорідну хвилю.

1.2. Отримано якісне фізичне обґрунтування можливості вимірювання енергетичних характеристик розсіяння об'єктів, розташованих у вказаній області всередині ПДХ, адекватних характеристикам розсіяння об'єктів у вільному просторі в полі плоскої однорідної хвилі.

1.3. Отримані числові оцінки геометричних параметрів вимірювальної області, всередині якої повинен розміщуватись об'єкт дослідження.

2. Одержані співвідношення для визначення енергетичних характеристик розсіяння (переріз екстинкції та переріз зворотнього розсіяння) об'єкта всередині ПДХ, адекватних відповідним характеристикам розсіяння плоских однорідних хвиль на фізичних тілах у вільному просторі, сформульовано аналог оптичної теореми для випадку хвилеводного розсіяння.

3. Отримано рішення задачі розсіяння електромагнітних хвиль на об'єкті сферичної форми в круглому ПДХ. Визначені характеристики розсіяння ідеально провідної сфери всередині ПДХ. Показано їх добрий збіг в межах вимірювальної області ПДХ з відповідними характеристиками розсіяння сфери у вільному просторі в полі плоскої однорідної хвилі. Експериментально встановлено відповідність енергетичних характеристик зворотнього розсіяння металевих сфер всередині ПДХ з отриманими розрахунковими даними. Доведена можливість використання металевих сфер з діаметром меншим діаметру вимірювальної області в якості еталонних розсіювачів при масштабному фізичному електродинамічному моделюванні енергетичних характеристик розсіяння об'єктів в ПДХ.

4. Розроблено новий розрахунковий інструмент для аналізу квазіоптичних переходів, виконаних на основі ПДХ з різними видами межових структур, при цьому:

4.1. Уведено параметр ϵ_{eff} , характеризуючий тип межової структури ПДХ та отримано його вирази для меж типу "діелектрик-діелектрик" і "шар діелектрика на металі".

4.2. На основі методу поперечних перерізів одержані формули для визначення втрат в ПДХ з повільно мінливим поперечним перерізом.

4.3. Установлені умови оптимізації квазіоптичних кругових конусних лінійних переходів з межами типу "діелектрик-діелектрик" та "шар діелектрика на металічній поверхні"

4.4. Порівняння розрахункових значень згасання основної HE_{11} -моди в квазіоптичному круговому конусному лінійному переході для випадку чисто діелектричної межі з одержаними експериментальними даними підтвердило ефективність розробленого розрахункового інструмента.

4.5. Доказана можливість використання квазіоптичних кругових конусних лінійних переходів для сполучення квазіоптичних трактів, виконаних на основі круглих ПДХ різного діаметру, в системах електродинамічного моделювання на субміліметрових хвилях.

Апробація роботи та публікації. Результати викладені в матеріалах дисертації неодноразово обговорювались на наукових семінарах "Радіофізика та електроніка міліметрових і субміліметрових хвиль" ІРЕ НАН України та доповідались на III Всесоюзній школі з розповсюдження міліметрових і субміліметрових хвиль в атмосфері (Харків, 12-17 жовтня 1989р.), I Українському симпозиумі "Фізика та техніка міліметрових і субміліметрових радіохвиль" (Харків, 15-18 жовтня 1991р.), Міжвідомчій науково-технічній конференції "Прилади, техніка і розповсюдження мм і субмм хвиль" (Харків, 30 червня - 3 липня 1992р.), 2-nd International Conference on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology (ICMWFT92) (Beijin, China, 17-22 August 1992), Eighteenth International Conference on Infrared and Millimeter Waves (Colchester, United Kingdom, 6-10 September 1993), II Всеросійській школі-семінарі "Фізика і застосування мікрохвиль. Міліметрові та субміліметрові хвилі" (Москва, 17-23 травня 1993р.), Asia-Pacific Microwave Conference (Hsinchu, Taiwan China, 18-22 October 1993), International Conference on Millimeter and Submillimeter Waves and Applications (San Diego, California, USA, 10-14 January 1994), International Conference on Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkov, Ukraine, 7-10 June 1994), 19th International Conference on Infrared and Millimeter Waves (Sendai, Japan, 17-20 October 1994), International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (Torino, Italy, 12-15 September 1995).

Всі результати, які вийшли до дисертації, одержані або особисто автором, або при його безпосередній участі. Всього по темі дисертації опубліковано 22 роботи. Найбільш важливі з них приведені в кінці автореферату.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків та бібліографії. Вона містить 107 сторінок основного тексту, 29 сторінок малюнків і список цитованої літератури із 103 найменувань на 14 сторінках.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проаналізовано стан проблеми, обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи, коротко описано її зміст, приведені основні положення, що підлягають захисі, а також відомості, пов'язані з апробацією роботи.

В першому розділі дисертації описана фізична модель вивчення характеристик розсіяння об'єктів за допомогою круглого ПДХ. Для її якісного обґрунтування розглянуті характеристики вказаної хвилеведучої структури з точки зору модового та променевого аналізу. Виходячи із відомої тотожності Якобі $1 = J_0(x) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(x)$, а також дуалізму модової і променевої картин електромагнітного поля, одержано нове променеве уявлення основної моди HE_{11} круглого ПДХ, яке полягає в тому, що променевій будові поля даної моди ставиться у відповідність ряд сімейств променів, кожне з яких поширюється у певній області простору циліндричної форми з віссю, що збігається з віссю хвилевода. При цьому може бути виділена така область простору навколо осі круглого ПДХ, де існує тільки сімейство променів, що поширюється паралельно осі хвилевода і представляє плоску однорідну хвилю. Це дозволило дати не тільки якісне фізичне обґрунтування можливості вимірювання характеристик розсіяння об'єктів всередині ПДХ, адекватних характеристикам розсіяння об'єктів у вільному просторі в полі плоскої однорідної хвилі, але й дозволило провести числові оцінки геометричних параметрів вимірювальної області, всередині якої повинен розміщуватись об'єкт дослідження. Радіус $r_{k,2}$ поперечного перерізу указаної області приблизно визначається співвідношенням:

$$r_{k,2} \approx 0,8 a,$$

де a - радіус внутрішнього каналу ПДХ.

В цьому розділі також визначені параметри, які характеризують розсіяння на фізичних тілах всередині круглого ПДХ, адекватні параметрам, які характеризують розсіяння у вільному просторі. Так, вираз, що визначає переріз екстинкції фізичного об'єкта всередині ПДХ C_{ext}^w , має вигляд:

$$C_{ext}^w = \frac{2N_i \operatorname{Re} c_{+i}}{I_{inc}},$$

де i - індекс моди, падаючої на фізичне тіло;

N_i - норма моди з індексом i ,

c_{+i} - коефіцієнт проходження моди з індексом i ,

I_{inc} - інтенсивність падаючої моди в центрі круглого ПДХ.

Даний вираз є хвилеводним аналогом оптичної теореми. Крім того, отриманий вираз дозволяє сформулювати наступний висновок: якщо в межах розсіюючого тіла сформувати плоску однорідну хвилю та звести до мінімуму перевідбиття між тілом та стінками хвилеводу, то за допомогою коефіцієнта проходження падаючої на фізичне тіло моди можна визначити екстинкцію розсіюючого тіла, рівну екстинкції такого ж тіла у вільному просторі. Визначено також переріз зворотного розсіяння C_b^w фізичного об'єкта всередині ПДХ:

$$C_b^w = \frac{k^2 N_i^2 |c_{-i}|^2}{\pi I_{inc}^2},$$

$$\text{де } k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

λ - довжина хвилі,

c_{-i} - коефіцієнт відбиття падаючої на тіло моди.

Приведені вище вирази встановлюють зв'язок між процесами енергетичного розсіяння у вільному просторі та всередині ПДХ.

У другому розділі викладаються результати теоретичного та експериментального дослідження характеристик розсіяння об'єкта сферичної форми всередині круглого ПДХ (центр сфери лежить на осі хвилеводу). При цьому теоретично задача розв'язувалась за допомогою методу розділення перемінних, який є історично першим точним методом вирішення задачі розсіяння плоских однорідних хвиль на сфері у вільному просторі. Слід відзначити, що вживання указанного методу до задачі "сфера всередині круглого ПДХ" зв'язане з великими труднощами внаслідок необхідності одночасного задоволення межовим умовам як

на поверхні сфери, так і на внутрішній поверхні хвилеведучого каналу. Однак, задача істотно спрощується, якщо знехтувати перевідбиттям електромагнітних хвиль між стінками внутрішнього каналу ПДХ і поверхнею сферичного об'єкта, що можливо по двом причинам:

1) різниця в показниках заломлення матеріалу внутрішньої межі каналу n_0 та середовища, заповнюючого канал n_1 , мала (саме такі ПДХ використовуються для цілей електродинамічного моделювання, що, в свою чергу, і пояснює вибір в якості досліджуваних моди HE_{1m} , оскільки основною модою круглого ПДХ, при умові $n_1 < 2,02n_0$, є мода HE_{11});

2) розмір сферичного об'єкта малий (радіус сфери менший за радіус вимірювального об'єкта, визначеного в першому розділі).

Подальший розв'язок проводився по традиційній для методу розділення перемінних схемі. Електромагнітне поле падаючої на сферу моди подавалося у вигляді розкладання в ряд по сферичним векторним хвильовим функціям, а за допомогою одержаних співвідношень і межових умов на поверхні даного об'єкта знаходилося розсіяне сферою поле. Далі за допомогою методу, викладеного в роботі [2], визначались коефіцієнти збудження мод, які з'являються в результаті розсіяння на вказаному об'єкті, що дозволило за допомогою формул, одержаних в першому розділі, визначити параметри, характеризуючі розсіяння на ідеально провідній сфері всередині круглого ПДХ, адекватні параметрам, характеризуючим розсіяння у вільному просторі в полі плоскої однорідної хвилі і показати їх хороший збіг в межах вимірювальної області круглого ПДХ.

Для експериментальної перевірки можливості вимірювання характеристик розсіяння об'єктів в круглому ПДХ, а також для порівняння отриманих теоретичних результатів дослідження характеристик розсіяння сферичного об'єкта всередині ПДХ з експериментальними даними була розроблена квазіоптична лабораторна установка на основі круглого ПДХ з внутрішнім діаметром 20мм, яка забезпечувала роботу у режимі приймання доплеровських сигналів, відбитих від об'єкта дослідження, при зворотно-поступальному русі останнього вздовж осі ПДХ. При цьому використовувались металеві сфери діаметром від 2мм до 18мм, що перекривали в робочому діапазоні довжин хвиль 1,4÷1,6мм найбільш цікаву резонансну область розсіяння. Установлено відповідність характеристик зворотного розсіяння металевих сфер всередині ПДХ з отриманими розрахунковими даними в межах вимірювальної області.

В третьому розділі подано новий підхід до вирішення задач, зв'язаних з аналізом квазіоптичних плавних переходів, виконаних на основі ПДХ, що використовуються при побудові систем електродинамічного моделювання на

субміліметрових хвилях. Суть даного підходу полягає в тому, що, виходячи із можливості постановки на внутрішній межі ПДХ межових умов імпедансного виду [3], був запроваджений параметр ϵ_{eff} , характеризуючий тип межової структури ПДХ (подібно тому, як це було зроблено в задачах дослідження поширення електромагнітних хвиль вздовж земної поверхні [4], де уведення параметра ϵ_{eff} зв'язано з уточненням дії межі розділу). Вказаний параметр був визначений для двох типів меж розділу. Так, для межі типу "діелектрик-діелектрик" він задається виразом

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_1^2 / (\epsilon_1 - 1),$$

а для межі типу "шар діелектрика на металічній поверхні" -

$$\epsilon_{eff} = \left(\epsilon_1^2 \operatorname{ctg}^2(kd\sqrt{\epsilon_1 - 1}) \right) / (1 - \epsilon_1),$$

де ϵ_1 - діелектрична проникність матеріалу хвилеводного каналу ПДХ,

d - товщина шару діелектрика,

а діелектрична проникливість середовища, заповнюючого канал, дорівнює одиниці. Уведення такого параметру дозволило на основі методу поперечних перерізів [5] створити розрахунковий інструмент для аналізу плавних нерегулярностей ПДХ (зокрема, квазіоптичних хвилеводних переходів - нерегулярностей ПДХ у вигляді повільно мінливого перерізу) з різними видами межових структур. За допомогою одержаного розрахункового інструмента були досліджені кругові конусні лінійні квазіоптичні переходи з границями типу "діелектрик-діелектрик" і "шар діелектрика на металічній поверхні", при цьому була показана можливість оптимізації розмірів таких переходів за мінімумом збудження паразитних мод, а використання променевої будови електромагнітного поля в таких переходах і визначення їх адиабатичного інваріанта дозволило отримати аналітичний вираз для проведення вказаної оптимізації.

В роботі було проведено експериментальне вивчення затухання основної HE_{11} -моди ПДХ в круговому конусному лінійному квазіоптичному переході з межею типу "діелектрик-діелектрик", при цьому подані результати порівняння розрахункових значень з відповідними даними, одержаними дослідним шляхом, показали добрий збіг.

У висновках сформульовані основні результати дисертаційної роботи та указані перспективні області їх застосування.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ РОБОТИ

1. Отримане променеве уявлення електромагнітного поля основної HE_{11} - моди круглого ПДХ дозволило виділити таку область простору циліндричної форми усередині хвилевода, в якій існує сімейство променів, яке поширюється паралельно осі хвилевода. Це дало не тільки якісне фізичне обґрунтування можливості вимірювання енергетичних характеристик розсіяння об'єктів всередині ПДХ, адекватних відповідним характеристикам розсіяння об'єктів у вільному просторі в полі плоскої однорідної електромагнітної хвилі, але й отримати числові оцінки розмірів вимірювальної області, всередині якої повинен розташовуватись об'єкт дослідження.

2. Визначені енергетичні параметри, характеризуючі розсіяння на фізичному об'єкті всередині ПДХ (переріз екстинкції, переріз зворотного розсіяння) адекватні відповідним параметрам такого ж тіла у вільному просторі в полі плоскої однорідної хвилі. Це дозволило, зокрема, сформулювати аналог оптичної теореми, характеризуючої процес розсіяння у вільному просторі, для випадку хвилеводного розсіяння.

3. Розроблена квазіоптична доплерівська лабораторна установка на основі круглого ПДХ з внутрішнім діаметром 20мм та методика вимірювань ефективної площі розсіяння об'єктів у ПДХ.

4. Теоретично та експериментально отримані енергетичні характеристики розсіяння провідного об'єкта сферичної форми, розташованого на осі круглого ПДХ, що важливо для перевірки точності моделювання енергетичних характеристик розсіяння об'єктів всередині ПДХ, а також для вимірювання характеристик розсіяння інших об'єктів, які визначаються шляхом порівняння з вказаним еталонним об'єктом. Ці дослідження показали також високу ступінь збудження мод вищих порядків при розсіянні на сфері основної моди. Тому при створенні лабораторних систем з використанням ПДХ в якості основного вимірювального елемента необхідно вибирати ПДХ з такими межовими структурами, які зможуть забезпечити ефективну фільтрацію паразитних мод.

5. Розроблено інструмент розрахунку квазіоптичних переходів утворених різними видами межових структур, який ґрунтується на можливості уведення параметра ϵ_{eff} , характеризуючого кожен таку межову структуру, а також на методі поперечних перерізів. За допомогою цього розрахункового інструменту був проведений аналіз квазіоптичних лінійних конусних переходів з двома видами межових структур: 1) межа типу "діелектрик-діелектрик", 2) межа типу "шар

діелектрика на метали". Це має практичне значення, оскільки переходи з такими межами використовуються не тільки в системах фізичного електродинамічного моделювання, але і в інших вимірювальних системах субміліметрового діапазону хвиль. Проведений аналіз показав можливість оптимізації розмірів квазіоптичних лінійних конусних переходів за мінімумом збудження найближчої паразитної моди, а також дозволив отримати аналітичний вираз, за допомогою якого можна проводити таку оптимізацію. Зміряне в лінійному квазіоптичному переході з чисто діелектричною межею затухання основної моди виявило досить добрий збіг розрахункових та експериментальних даних, що підтвердило ефективність розробленого розрахункового інструмента.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kiselyev V.K., Kushta T.M. Method for Radar Cross Section Measurements in Millimeter and Submillimeter Wave Regions // International Journal of Infrared and Millimeter Waves.- 1995.- Vol.16, No.6.- P.1159-1165.
2. Киселев В.К., Кушта Т.М., Литвинов Д.Д. Методика расчета решеточных поляризационных разделителей для квазиоптических поляриметров // Известия вузов. Радиоэлектроника.- 1987.-Т.30, №5.- С. 28-32.
3. Киселев В.К., Кушта Т.М. Переходы для квазиоптических трактов субмиллиметрового диапазона волн // Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: Сборник научных трудов ИРЭ НАН Украины.- Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1990.- С.128-131.
4. Киселев В.К., Кушта Т.М. Преобразование мод в круглых конусных переходах для квазиоптических трактов субмиллиметрового диапазона волн // Физические исследования с использованием радиоволн мм и субмм диапазонов: Сборник научных трудов ИРЭ НАН Украины.- Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1991.- С.94-97.
5. Киселев В.К., Кушта Т.М., Марюхин Г.А., Яновский М.С. Расчет переходов между квазиоптическими волноводами // Научное приборостроение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах радиоволн: Сборник научных трудов ИРЭ НАН Украины.- Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1992.- С.44-50.
6. Киселев В.К., Кушта Т.М. Квазиоптический метод исследования характеристик рассеяния объектов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах радиоволн // Использование радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: Сборник научных трудов ИРЭ НАН Украины.- Харьков: ИРЭ НАН Украины, 1993.- С.144-148.

7. Kiselyev V.K., Kushta T.M. Scattering of Guided Modes by Sphere in a Quasi-Optical Waveguide of the Class of "Hollow Dielectric Channel" // Proceeding SPIE.- 1993 - Vol.2104.- P.202-203.
8. Kiselyev V.K., Kushta T.M. Scattering from a Finite Cylinder inside a Quasi-Optical Waveguide of the Class of "Hollow Dielectric Channel" // Proceeding SPIE.- 1994.- Vol.2250.- P.346-347.
9. Kiselyev V.K., Kushta T.M. Method for Investigation of Object Scattering Characteristics in Millimeter and Submillimeter Wave Ranges // 19th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, K. Sakai, T. Yoneyama, Editors, Proceeding JSAP Cat. Number: AP 941228.- 1994.- P.514-515.
10. Kiselyev, Kushta T.M. The Calculation of the Transitions between the Quasi-Optical Waveguides // Proceeding Second Int. Conf. on Millimeter Wave and Far-Infrared Technology (ICMWFT'92) - Beijing, China, 1992 - P.335-338.
11. Kiselyev V.K., Kushta T.M. Quasi-Optical Method For Radar Reflectivity Measurement // Proceeding Int. Conf. on Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves.- IRE NANU, Kharkov, Ukraine, 1994.- Vol.3.- P.646-649.
12. Кисельов В.К., Кушта Т.М. Спосіб вимірювання характеристик розсіяння об'єкта у субміліметровому діапазоні радіохвиль і пристрій для його здійснення. Заявка № 940421870 о выдаче патента Украины. Полож. решение от 5 июня 1995г.
13. Киселев В.К., Кушта Т.М. Преобразование мод квазиоптического волновода класса "полый диэлектрический канал" на сфере // Тез. докл. I Украинский симпозиум "Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн". - Харьков: ИРЭ АН УССР, 1991, ч.1.- С.258-259.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Горошко А.И., Кулешов Е.М. Исследование полого диэлектрического лучевода миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн // Радиотехника: Сб. научн. тр.- Харьков: Харьк. университет, 1972.- Вып. 21.- С.215-219.
2. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны.- М.: Радио и связь, 1988.- 440с.
3. Казанцев Ю.Н., Харлашкин О.А. Круглые волноводы класса "полый диэлектрический канал" // Радиотехника и электроника.- 1984.- Т.29, №8.- С.1441-1450.
4. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности.- М.: Изд. АП СССР, 1961.- 547с.
5. Каценеленбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами.- М.: Изд. АН СССР, 1961.- 216с.

758.28 вА

Кушта Т.М. Квазиоптические структуры типа круглый полый диэлектрический волновод в задачах физического электродинамического моделирования на субмиллиметровых волнах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиоп физика. - Институт радиоп физики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 1996.

Диссертация посвящена вопросам физического обоснования возможности нетрадиционного применения круглых ПДВ, а именно построения на их основе своеобразных микробеззубых камер для электродинамического моделирования на субмиллиметровых волнах. Экспериментально и теоретически определены характеристики рассеяния объекта сферической формы внутри ПДВ, сравнение которых с аналогичными характеристиками рассеяния плоской однородной волны на проводящей сфере в свободном пространстве показало достаточно хорошее их совпадение и подтвердило правильность выработанных критериев оценки параметров измерительной области. Предложен новый подход к исследованию нерегулярных волноведущих структур типа ПДВ с медленно меняющимися параметрами, который был применен для изучения квазиоптических круговых линейных конусных переходов с диэлектрической и металло-диэлектрической граничными структурами, при этом расчетные значения были подтверждены экспериментом.

Kushta T.M. Quasi-optical structures of the circular hollow dielectric waveguide type in problems of physical electrodynamics modeling on submillimeter waves. - The manuscript.

The dissertation advanced for a scientific degree of a candidate of physics and mathematics in the speciality 01.04.03 - Radiophysics. - A.Usikov Institute of Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkov, 1996.

A physical substantiation of scope for unusual application of a circular hollow dielectric waveguide (HDW) - the design in their terms of a off-beat microanechoic chamber is given in the dissertation. Scattering characteristics of a spherical object inside circular HDW are defined and their agreement with scattering characteristics of plane homogeneous wave by a spherical object in free space corroborated validity of determinate criteria for the evaluation of measurement area parameters. A new approach for investigation of irregular wave guiding structure of HDW type with slowly varying parameters which is used for study of circular linear conical quasi-optical transitions with metal and metal-dielectric boundaries is suggested, herewith calculated data were confirm by the experiment.

Ключові слова: електродинамічне моделювання, круглий порожнистий діелектричний хвилевід, субміліметрові хвилі.

110042

Ав 35.927

Наукове видання

Кушта Тарас Михайлович

**КВАЗІОПТИЧНІ СТРУКТУРИ ТИПУ КРУГЛИЙ ПОРОЖНИСТИЙ
ДІЕЛЕКТРИЧНИЙ ХВИЛЕВІД В ЗАДАЧАХ ФІЗИЧНОГО
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА
СУБМІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЯХ**

Відповідальний за випуск М.С. Яновський

Під. до друк. 22.10. 96р. Формат 60*84/16.

Папір офс. Офс. друк. Умов.-друк. ар. 1.0. Обл.-вид. ар. 1.1

Тираж 100 прим. Зак. № 83. Безкоштовно.

Ротапринт ІРЕ НАН України
Харків-85, вул. Акад. Проскури, 12.