

**ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

На правах рукопису

ГНИЛЕНКО ОЛЕКСІЙ БОРИСОВИЧ

**МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАНАРНИХ ХВИЛЕВЕДУЧИХ
СТРУКТУР ДЛЯ ОБ'ЄМНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ
СХЕМ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ**

01.04.03 – Радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

ДНІПРОПЕТРОВСЬК – 1995

37.86



00754267 (V)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики НВЧ радіофізичного факультету Дніпропетровського державного університету.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук, доцент Прохода Іван Георгійович.

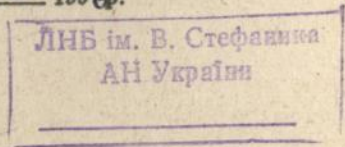
Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор Чумаченко Віталій Павлович;
кандидат фізико-математичних наук, доцент Овсяніков Віктор Володимирович.

Провідна організація: Харківський державний університет.

Захист відбудеться "28" березня 1996р. о "14" на засіданні Спеціалізованої Ради К 03.01.12 при Дніпропетровському державному університеті за адресою (320625, Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 72, радіофізичний факультет).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського державного університету (320050, Дніпропетровськ, вул. Казакова, 8).

Автореферат розіслано "11" лютого 1996р.



Вчений секретар
Спеціалізованої Ради
канд. фіз.-мат. наук

M. Kuz

Буданий М.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток систем зв'язку та обробки інформації ґрунтується на останніх досягненнях в розробленні та удосконаленні елементної бази радіоелектронної апаратури (РЕА) НВЧ діапазону. Жорсткі вимоги, які пред'являються до РЕА і пов'язані з необхідністю підвищення швидкості передачі та обробки інформації, а також зниження габаритів та маси РЕА, приводять до широкого впровадження у промисловість мікроелектронних пристроїв НВЧ, що базуються на використанні планарних інтегральних схем (ІС) в багатопланарному виконанні - моноітних або об'ємних інтегральних схем НВЧ (ОІС НВЧ) [1]. Перехід до інтегральної технології має передумовою автоматизацію всього процесу розробки компонентів та пристроїв РЕА, що пов'язано передусім з розвитком систем автоматизованого проектування (САПР). В свою чергу, побудова сучасних САПР ОІС НВЧ ґрунтується на створенні ефективного математичного апарату, що дозволяє з достатньою точністю моделювати процеси розповсюдження хвиль в базових елементах інтегральних схем [2].

Сучасні тенденції в розвитку інтегральної технології приводять до того, що багато з математичних моделей, які використовуються в САПР ОІС, стають далі некоректними. Так, в зв'язку з освоєнням діапазону більш високих частот, квазі-ТЕМ наближення не може застосовуватися для адекватного моделювання хвилеведучих структур. Звідси впливає необхідність використання строгих повнохвильових підходів, коректних в усьому частотному діапазоні, що використовується в сучасних мікроелектронних пристроях НВЧ. Збільшення щільності упаковки схемних компонентів не дозволяє нехтувати товщиною смужкових провідників, яка істотно впливає на характеристики зв'язаних по електромагнітному полю елементів схем. Традиційні для інтегральних схем мікросмужкові, щільні та конпланарні лінії передачі все частіше перестають задовільняти вимогам розробників елементної бази ОІС НВЧ. У той же час, удосконалення технології виробництва інтегральних схем забезпечує можливість створення нових типів хвилеведучих структур та пристроїв НВЧ на їх основі. Пошук нових конструкційних вирішень для ліній передачі, що приводять до ускладнення топології останніх, обумовлює інтерес до розробки узагальнених підходів, які дозволяють проводити аналіз широкого класу багатопланарних та багатопровідникових хвилеведучих структур. Узагальненість стає на цей час одною з основних вимог, що

пред'являються до методів моделювання ОІС НВЧ поруч в точністю та чисельною ефективністю.

Серед повнохвильових методів, що були модифіковані для аналізу багатопровідникових та багатопровідникових планарних ліній передачі, можна виділити дискретизаційні методи [3], які дозволяють розглядати хвилеведучі структури довільного поперечного перерізу. У той же час, для даних методів характерна погана обіжність, великий розмір характеристичної матриці і, отже, великі витрати комп'ютерного часу. Спектральний підхід [4] та метод сингулярних інтегральних рівнянь [5], що розглядаються зараз як найбільш ефективні засоби аналізу планарних ліній передачі, дають можливість використовувати при розв'язуванні задач на власні хвилі характеристичні матриці відносно невеликого порядку, проте, вастосовність даних методів обмежена тільки хвилеведучими структурами з нескінченно тонкими смужковими провідниками. На відміну від цих підходів, метод часткових областей (МЧО) [6] дозволяє враховувати скінченну товщину смужкових провідників. Відомо, що вастосування МЧО приводить до одержання нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), при розв'язуванні котрих методом зрівняння може виникнути явище "відносної" обіжності або відсутності обіжності наближених розв'язків. За умовою вибору визначеного співвідношення між порядком зрівняння нескінченної СЛАР та кількістю членів в рядах, що складають її елементи, можна дістати покоординатну обіжність розв'язків. Проте, математичному обґрунтуванню вастосовності наближених методів перешкоджає те, що одбуті СЛАР мають матричні оператори типу згортки, властивості яких не дозволяють скористатися загальною теорією операторних рівнянь при доведенні коректності процедури зрівняння [7]. Використання як базисних функцій проєкційного процесу поліномів Чебишева в врахуванні особливості поведінки поля поблизу ребер нескінченно тонких смужкових провідників робить можливим поліпшення обіжності МЧО [8]. Однак, при цьому в алгоритмі втягуються спеціальні функції, такі як функції Бесселя, що дещо знижує чисельну ефективність методу.

Розроблений на кафедрі фізики НВЧ ДДУ метод часткових перетинних областей (МЧПО) [9] має всі переваги МЧО та безпосередньо приводить до одержання СЛАР другого роду з цілком неперервним оператором, що дозволяє обґрунтувати вастосування наближених методів при знаходженні чисельних розв'язків. Проте, цей метод не було ро-

овиную для аналізу багат шарових планарних училеведучих структур в провідниками скінченної товщини, у зв'язку в чим не було можливим його застосування як ефективного засобу моделювання ліній передачі для ОІС НВЧ.

Таким чином, актуальність тема дисертації обумовлена, в одного боку, практичною потребою в розробленні математично обгрунтованих підходів до повнохвильового аналізу багат шарових ліній передачі в провідниками скінченної товщини та необхідністю розвитку методу часткових перетинних областей для розв'язування нового обширного класу задач прикладної електродинаміки. З другого боку, в умовах триваючого розвинення та удосконалювання елементної бази ОІС НВЧ актуальною є задача розробки нових перспективних хвилеведучих структур і дослідження їх властивостей та характеристик на основі використання розвинутих методів моделювання процесів розповсюдження хвиль.

Виходячи з цього, в роботі взято за мету:

- розробка строгого підходу до повнохвильового аналізу планарних хвилеведучих структур, який враховує багат шарове магнітодіелектричне заповнення та скінченну товщину зв'язаних по електромагнітному полю провідників;
- створення на основі комбінації розробленого підходу та методу часткових перетинних областей ефективних обчислювальних алгоритмів розв'язування задач на власні хвилі для ліній передачі, які є перспективними у використанні їх в ОІС НВЧ;
- проведення кількісного та якісного аналізу процесів розповсюдження електромагнітних хвиль в лініях передачі, що розглядаються.

Наукова новизна роботи. В роботі подано підхід до повнохвильового аналізу екранованих багат шарових та багат провідникових планарних хвилеведучих структур в провідниками скінченної товщини, геометрія яких дозволяє розбити складну область визначення електромагнітного поля на прямокутні багат шарові (та однорідні, часткові області. Запропонований підхід вперше використовує формулювання крайових задач в багат шарових часткових областях для повного електричного вектора гібридного поля та діадної функції Гріна електричного типу.

Для n -шарової часткової області, яка є в даному методі ключовою структурою, вперше одержані інтегральні зображення вектора електричного поля в шарах через його значення на відкритих ділянках межі

області. Інтегральні зображення враховують як довільну кількість шарів в аналізованих хвилеведучих структурах, так і довільну кількість смужкових провідників скінченної товщини в кожному шарі.

Для ключової n -шарової структури вперше одержано розв'язок крайової задачі для діадної функції Гріна електричного типу, яка є ядром інтегральних зображень.

Розроблений підхід в комбінації з технікою методу часткових перетинних областей дозволяє моделювати процеси розповсюдження хвиль в планарних лініях передачі складних конфігурацій. На основі даного підходу одержані електродинамічні алгоритми та проведено чисельне дослідження двох хвилеведучих структур:

1. Вперше запропонована та розв'язана задача на власні хвилі для мікросмужкової лінії передачі в складною формою внутрішнього провідника – ребрової мікросмужкової лінії, смужкової провідник якої має вертикальні ребра, що занурені у шар діелектрика та слугують для концентрації енергії електромагнітного поля робочої моди в підкладці.
2. Вперше проведено повнохвильовий аналіз зв'язаних мікросмужкових ліній в додатковим “підтримуючим” шаром діелектрика під нижнім смужковим провідником, які є перспективними у використанні в спрямованих відгалужувачах та фільтрах ОІС НВЧ.

Обґрунтованість та вірогідність результатів роботи забезпечується строгим, математично коректним методом, що використовує формулювання крайової задачі для гібридного поля в повній електродинамічній постановці, наявність чисельної обіжності результатів задач на власні хвилі та виконанням граничних переходів до добре вивчених ліній передачі. Здобуті результати допускають ясну інтерпретацію і добре погоджуються з фізичною картиною розповсюдження хвиль в структурах, що вивчаються. Для граничних переходів результати чисельного аналізу погоджуються з результатами відомих робіт.

Практична цінність роботи. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані при моделюванні процесів розповсюдження хвиль в планарних лініях передачі складних конфігурацій, в тому числі в багатопшарових та багатопровідникових хвилеведучих структурах з провідниками скінченної товщини. Розроблений підхід відзначається як універсальністю, так і математичною обґрунтованістю і може служити засобом створення ефективних обчислювальних алгоритмів строгого повнохвильового аналізу. Результати чисель-

ного дослідження розглянутих в роботі хвильоведчих структур дозволяють зробити висновки о можливості застосування останніх як базових елементів ОІС НВЧ і можуть бути цікаві в практичній точці зору для розробників РЕА НВЧ діапазону.

Основні положення дисертації, що виносяться на захист.

1. Розроблено строгий підхід до повнохвильового аналізу багатошарових та багатопровідникових планарних ліній передачі. Як ключова структура розглянута увагальнена n -шарова прямокутна область, що одержується в результаті розбиття ліній передачі складних конфігурацій на прості підобласті, для яких можна знайти розв'язки хвильового рівняння методом поділення змінних. Використовуючи формулювання крайових задач відносно повного електричного вектора гібридного поля та діадної функції Гріна електричного типу, для ключової структури одержані:

1.1. Інтегральні зображення, які визначають вектор електричного поля в шарах через значення поля на апертурах поверхні, що оточує увагальнену область.

1.2. Розв'язок крайової задачі для діадної функції Гріна електричного типу (матриці вимірністю 3×3), для компонентів якої одержані прості функціональні залежності від координат точок спостереження та джерел з коефіцієнтами, що вираховуються на ЕОМ за допомогою розробленої підпрограми.

2. На основі використання представленого підходу в рамках методу часткових перетинних областей проведено повнохвильовий аналіз таких хвильоведчих структур:

2.1. Ребрової мікросмушкової лінії передачі, для якої:

а) побудовано електродинамічні алгоритми і складено пакет прикладних програм для визначення постійних розповсюдження та компонентів електричного вектора;

б) проведено чисельне дослідження впливу ребер смужкового провідника на поведінку постійних розповсюдження основної та вищих типів хвиль, а також на структуру електричного поля основної хвилі в поперечному перерізі лінії передачі, що виявило такі результати:

— на основі вивчення поведінки постійної розповсюдження основної моди показано, що занурення ребер смужкового провідника у діелектричну підкладку спричиняє зменшення дисперсії постійної розповсюдження основної моди та "втягнення" силових ліній поля основної хвилі у підкладку;

— досліджено вплив ребер на поведінку постійних розповсюдження мод вищих типів і, таким чином, визначено робочий діапазон частот даної лінії передачі;

— при вивченні структури електричного поля в лінії виявлено значне підвищення концентрації поля основної хвилі в діелектричній підкладці під ребрами смужкового провідника при збільшенні висоти останніх.

2.2. Мікросмужкових ліній з щільним зв'язком, для яких:

а) побудовано електродинамічний алгоритм та складено пакет прикладних програм для визначення постійних розповсюдження;

б) проведено чисельне дослідження поведінки постійних розповсюдження основних та вищих типів хвиль при різних геометричних і матеріальних параметрах структури, що виявило такі результати:

— при вивченні впливу діелектричної проникності "підтримуючого" шару на постійні розповсюдження π - та σ -мод виявлена можливість вирівнювання значень постійних розповсюдження робочих мод;

— проведена оцінка робочого двохмодового діапазону лінії передачі. Виявлено явище взаємодії мод вищих типів та робочих мод.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались на:

— Всесоюзній конференції "Математическое моделирование и САПР радиоволновых систем СВЧ на ОИС" (Судзаль, 1989 г.);

— Всесоюзній конференції "Перспективы развития антенно-фидерной технологии и ее элементной базы" (Судзаль, 1992 г.);

— Всесоюзній конференції "СВЧ-техника и спутниковый прием" (Севастополь, 1993 г.);

— 24th General Assembly of URSI (Kyoto, Japan, 1993);

— 15th International Symposium of URSI on Electromagnetic Theory (St.-Petersburg, 1995).

Публікації. За матеріалами роботи опубліковано 11 друкованих праць, список яких наведено у кінці реферату.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 185 сторінках, з яких основний текст складає 144 сторінки. Робота містить 34 малюнки на 22 сторінках, складається із вступу, трьох розділів, висновків, 146 посилань на літературні джерела та додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність роботи, подано огляд літератури з питань розробки методів аналізу планарних хвилеводних структур для ОИС НВЧ, сформульована мета дисертації, наукова

новіона та практична цінність роботи, наведіть основні положення, що виносяться на захист, а також подано короткий зміст дисертації.

Перший розділ присвячено розробленню узагальненого підходу до моделювання багатошарових та багатопрвідникових планарних хвилеведучих структур. Застосування техніки МЧПО до аналізу ліній передачі приводить до розбиття складної області визначення поля на прості часткові підобласті, для яких можна знайти розв'язки хвильового рівняння методом поділення змінних. Як ключова структура розглянута n -шарова часткова область, яка може бути одержана після розбиття на перетинні підобласті деякої узагальненої багатошарової лінії передачі з довільною кількістю провідників скінченної товщини в кожному шарі. Використовується строге формулювання крайової задачі для повного електричного вектора гібридного поля в шарах області, який задовільняє векторним хвильовим рівнянням

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}^i(\vec{r}) - k_i^2 \vec{E}^i(\vec{r}) = 0, \quad \vec{r} \in V_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

крайовим умовам Діріхле на ідеально провідних ділянках межі області (поверхнях смужкових провідників та екрану), умові чеперервності для тангенціальних компонентів на межах поділу між шарами, умові на ребрі у формі належності розв'язків класу функцій Гельдера та умові випромінювання на нескінченності для хвилеводів.

Відповідна крайова задача для діадної функції Гріна електричного типу є узагальненням на випадок багатошарової хвилеведучої структури формулювання крайової задачі для функції Гріна „двох ізотропних середовищ з різними проміжностями, що була запропонована в роботі [10]. Діадна функція Гріна ключової багатошарової області задовільняє рівнянням

$$\nabla \times \nabla \times \vec{G}^{ik}(\vec{r}|\vec{r}') - k_i^2 \vec{G}^{ik}(\vec{r}|\vec{r}') = \delta_{ik} \vec{I} \delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad \vec{r} \in V_i, \quad \vec{r}' \in V_k; \\ i, k = 1, \dots, n,$$

крайовим умовам для діадної функції Гріна першого роду на поверхні, що оточує область, змішаним умовам неперервності для функції Гріна третього роду на межах поділу між шарами та умові випромінювання на нескінченності для хвилеводів.

Використання теореми Гріна в діадній формі дозволяє звести вихідні крайові задачі до набору інтегральних зображень шуканого електричного вектора в шарах через його значення на відкритих

ділянках (апертурах) межі області

$$\vec{E}^i(x, y, \gamma) = - \sum_{k=1}^n \sum_{\tau=1}^{N_k} \frac{\mu_k}{\mu_k} \int_{d_k} (\vec{n}_d \times \vec{E}^k(x', y', \gamma)) \cdot ((\nabla'_{xy} - j\gamma \vec{z}_0) \times \vec{G}^{ki}(x', y'|x, y, -\gamma)) dV'$$

Компоненти діадної функції Гріна зображаються у вигляді розв'язання у ряд за повною системою власних функцій області з коефіцієнтами, якими є невідомі функції невиключеної координати ("джерелообразне зображення" по термінології [1]):

$$G_{pq}^{ik}(x, y|x', y', -\gamma) = \sum_{m=0}^{\infty} \varphi_{mp}(x) \varphi_{mq}(x') F_{mpq}^{ik}(y, y', -\gamma), \quad p, q = x, y, z.$$

Розв'язування крайової задачі для діадної функції Гріна електричного типу введено до визначення одновимірних альтернувальних частин функції Гріна $F_{mpq}^{ik}(y, y', -\gamma)$, які задовільняють омішанкам умовам неперервності третього роду на межах поділу між шарами. Для випадку двохшарової часткової області одержані втраєн для невідомих альтернувальних функцій "джерелообразного" зображення в оамкненій формі. Для шуканих функцій n -шарової часткової області одержані аналітично прості вираєн

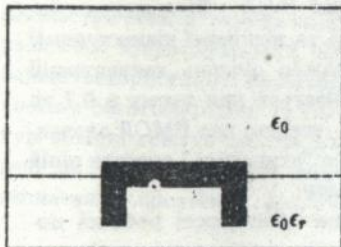
$$F_{mpq}^{ik}(y, y', -\gamma) = \alpha_{1,2mpq}^{ik} \cos k_{my}^i y \cos k_{my}^k y' + \alpha_{2,2mpq}^{ik} \cos k_{my}^i y \sin k_{my}^k y' + \beta_{1,2mpq}^{ik} \sin k_{my}^i y \cos k_{my}^k y' + \beta_{2,2mpq}^{ik} \sin k_{my}^i y \sin k_{my}^k y',$$

в коефіцієнтами $\alpha_{1,2mpq}^{ik}$ та $\beta_{1,2mpq}^{ik}$, які визначаються за допомогою підпрограми для ЕОМ. Вхідними параметрами підпрограми є значення товщин та провідностей діелектричних шарів. Розроблена підпрограма має достатньо універсальну форму, що є адаптованою до використання в пакетах прикладних програм для аналізу хвилюведчих структур самого широкого класу.

Одержані асимптотичні оцінки та чисельно досліджена збіжність альтернувальних частин компонентів діадних функцій Гріна для двохшарового та багатшарового випадків.

Використовуючи інтегральні зображення поля в багатшарових часткових областях спільно в розроблену техніку визначення компонентів діадної функції Гріна електричного типу та додержуючись схеми методу часткових перетинних областей, можуть бути одержані ефективні алгоритми повнохвилювого аналізу планарних хвилюведчих структур складних конфігурацій.

У другому розділі на основі розробленого підходу проведено повнохвильовий аналіз зображеної на мал. 1 ребрової мікросмушкової лінії передачі (РМСЛ). Ця лінія може розглядатися як розроблений на основі мікросмушкової лінії аналог двохщільниної циліндрично-щільниної лінії [12] та ребрової несиметричної щільниної лінії передачі [13].



Мал. 1

Використовуючи комбінацію розробленого в першому розділі підходу та техніки методу часткових перетинних областей, для розглянутої хвильоведучої структури одержана система інтегральних рівнянь типу Фредгольма другого роду, яка зводиться за допомогою проекційної процедури методу Гальоркіна до однорідної нескінченної СЛАР другого роду відносно амплітудних коефіцієнтів в розвиненнях у ряд компонентів

поля. Доведена ω -цілком неперервність елементів блочного матричного оператора характеристичної СЛАР і обґрунтовано застосування методу зрівняння при розв'язуванні дисперсійного рівняння. Розроблено алгоритм моделювання структури поля в лінії передачі, які аналізуються методом часткових перетинних областей. Одержані аналітичні вирази, що дозволяють визначити усі компоненти електричного вектора у будь-якій точці поперечного перерізу РМСЛ.

Для оцінки ефективності побудованого алгоритму розв'язування спектральної задачі чисельно визначені похибки, які спричиняються застосуванням методу зрівняння до нескінченного матричного оператора. Досліджено оминювання відносної похибки обчислювання кореней дисперсійного рівняння в залежності від порядку зрівняння матричних блоків та кількості членів, які враховуються во внутрішніх сумах. Проведено порівняння результатів, що одержані за умовою граничного переходу до мікросмушкової лінії (МСЛ) з аналогічними даними відомих робіт. Виявлено добре погодження з результатами строгих повнохвильових методів в широкій смузі частот.

Проведено чисельне дослідження процесів розповсюдження хвиль в РМСЛ з метою в'яснення впливу ребер на характеристики даної лінії передачі. Вивчено вплив ребер на поведінку нормованої

постійної розповсюдження основної моди в широкому діапазоні частот. Виявлено, що ребра смужкового провідника, які занурюються у діелектричну підкладку, спричиняють збільшення значення ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{eff} = (\gamma/k_c)^2$, а, отже, і збільшення концентрації електромагнітного поля основної хвилі в підкладці. Так, при зануренні ребер у діелектричну підкладку на 80% її товщини, ефективна діелектрична проникність збільшується при частоті 1 ГГц на 31% в порівнянні з ϵ_{eff} звичайної МСЛ. Відношення значень ефективної діелектричної проникності та відносної діелектричної проникності підкладки $\epsilon_{eff}/\epsilon_r$, що відображає ступінь концентрації електромагнітного поля в підкладці, змінюється при цьому з 0.7 до 0.95. На частоті 50 ГГц відношення $\epsilon_{eff}/\epsilon_r$ досягає для РМСЛ значення 0.997, що свідчить про практично повне "втягнення" силових ліній поля основної хвилі у діелектричну підкладку.

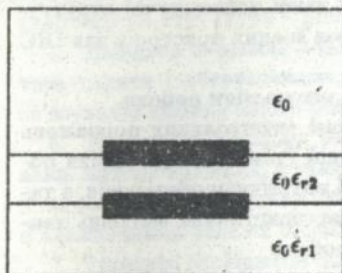
Досліджено вплив ребер на дисперсійні властивості робочої моди РМСЛ. Використання ребер на краях смужкового провідника приводить до значного зниження дисперсії постійної розповсюдження основної моди. Дисперсія на інтервалі частот від 1 ГГц до 50 ГГц зменшується для зазначеної вище конфігурації РМСЛ на 82% відносно випадку звичайної МСЛ.

Оцінено вплив ребер на дисперсійні характеристики постійних розповсюджених мод вищих типів. Установлено, що занурення ребер у діелектричну підкладку не відбивається на поведінці вищих парних мод, у той час як частоти відсічки вищих непарних мод зменшуються, що декілька зужує робочий діапазон частот РМСЛ (з 10.5 ГГц до 7 ГГц для розглянутої геометрії структури).

Проведено дослідження впливу ребер на розподіл напруженості електричного поля в РМСЛ при різних значеннях частоти. Визначена структура електричного поля в поперечному перерізі РМСЛ для ребер різної висоти. Вивчення розподілу абсолютного значення нормованої поперечної складової вектора напруженості електричного поля основної моди $|E_x| = \sqrt{E_z^2 + E_y^2}$ в поперечному перерізі структури показує, що електричне поле зосереджено головним чином під ребрами смужкового провідника, причому концентрація поля значно зростає при зануренні ребер у підкладку. Так, при ребрах, які занурені у діелектрик на 80% товщини підкладки, $|E_x|$ збільшується відносно випадку звичайної МСЛ на 455% під ребрами і на 26% під центральною частиною смужкового провідника.

На основі результатів чисельного аналізу зроблені висновки о можливостях практичного використання РМСЛ як одного з базових елементів ОІС НВЧ.

Третій розділ присвячено повнохвильовому аналізу мікросмужкових ліній з линеарним зв'язком, які розташовані на двохшаровій підкладці з додатковим "підтримуючим" шаром діелектрика під нижнім смужковим провідником (Мал. 2). Ця хвилеведуча структура є несиметричним у вертикальному напрямі аналогом добре вивчених зв'язаних мікросмужкових ліній на "підвищеній" підкладці [14]. На основі використання представленого в першому розділі підходу до аналізу багатопарових та багатопровідникових хвилеведучих структур вихідні крайові задачі для часткових перетинних областей введени до СЛАР другого роду, яка дає дисперсійне рівняння для визначення постійних розповсюдження повного набору гібридних



Мал. 2

власних хвиль. На основі асимптотичних оцінок елементів матричних операторів, які входять до блочної матриці характеристичної СЛАР, доведена ω -цілком неперервність останніх і обґрунтовано, таким чином, застосування методу рівняння при розв'язуванні дисперсійного рівняння.

Проведено чисельний аналіз обійності алгоритму і порівняння з результатами відомих робіт за умовою граничного переходу до зв'язаних мікросмужкових ліній на

"підвищеній" підкладці. Виявлено добре погодження з даними квазі-ТЕМ підходів на низьких частотах та з результатами повнохвильових методів у широкому діапазоні частот.

Чисельно досліджені характеристики хвилеведучої структури з метою виявлення можливостей її використання при створенні зв'язаних пристроїв. Оцінено вплив "підтримуючого" шару на характеристики хвилеведучої структури, які відіграють важливу роль при розробці спрямованих відгалужувачів та фільтрів НВЧ. Вивчена поведінка нормованих постійних розповсюдження основних e - та π -мод при різних співвідношеннях діелектричних проникностей шарів

підкладки. Показано, що при змінюванні співвідношення діелектричних проникностей шарів відбувається обмін типами основних мод в області обігу проникностей: ϵ -мода переходить в π -моду та навпаки. Наявність "підтримуючого" шару дозволяє варіювати таку важливу характеристику зв'язаних ліній передачі як відношення ефективних діелектричних проникностей (постійних розповсюдження) робочих мод в достатньо широких межах. Так, у відсутність "підтримуючого" шару (при $\epsilon_{r1} = 1, \epsilon_{r2} = 5$), відношення $\epsilon_{eff}^2 / \epsilon_{eff}^0$ дорівнює 3.16, у той час, як введення "підтримуючого" шару з діелектричною проникністю $\epsilon_{r1} \approx \epsilon_{r2}$ може зменшити це відношення до 1.03. Вивчені закономірності процесу розповсюдження робочих хвиль при зміні співвідношення товщин діелектричних шарів підкладки. Одержані дисперсійні характеристики хвиль вищих типів і оцінені межі двохмодового робочого діапазону даної лінії передачі. Виявлено явище міжмодової взаємодії основних мод та мод вищих типів.

На основі результатів чисельного аналізу зроблені висновки о можливостях практичного застосування даної хвилеведучої структури при розробці широкосмугових сильнозв'язаних пристроїв для ОІС НВЧ.

У закінченні сформульовані основні результати роботи.

В додатки винесені питання побудови інтегральних зображень та одержані компоненти діадних функцій Гріна для однорідних областей, доведення ω -цілком неперервності матричних операторів, а також аналітичні вирази для елементів характеристичних матриць хвилеведучих структур, які аналізуються в роботі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ РОБОТИ

1. Розроблено узагальнений підхід, що дозволяє в рамках методу часткових перетинних областей проводити строгий новохвильовий аналіз процесів розповсюдження хвиль в планарних лініях передачі складних конфігурацій. Клас аналізованих структур охоплює лінії передачі в багатшарових магнітодіелектричних наповненнях та складною формою провідників скінченної товщини, які довільно розташовані в шарах підкладки.

2. Для прямокутної часткової області, що одержується в результаті розбиття ліній передачі складних конфігурацій на прості підобласті і розглядається в даному підході як ключова структура, побудовані інтегральні зображення повного електричного векто-

ра гібридного поля. Інтегральні зображення враховують багатошарове магнітодіелектричне наповнення і довільну кількість провідників в кожному шарі лінії передачі.

3. Розв'язана кінцева задача для діадної функції Гріна електричного типу багатошарової часткової області. Для компонентів діадної функції Гріна одержані аналітичні прості "джерелообразні" зображення. Альтернувальні частини "джерелообразних" зображень виражаються через коефіцієнти, які обчислюються за допомогою розробленої підпрограми. Вхідними параметрами підпрограми є значення товщин та проникністей шарів, які наповнюють область. Досліджена асимптотична поведінка альтернувальних частин компонентів діадної функції Гріна при великих значеннях індекса підсумовування.

4. На основі використання розробленого підходу побудовано строгі обчислювальні алгоритми і складено пакет прикладних програм для визначення постійних розповсюдження та компонентів вектора електричного поля власних хвиль вперше запропонованої в даній роботі хвилеведучої структури — ребрової мікросмушкової лінії передачі.

5. Доведена ω -цілком неперервність елементів матричного оператора задачі і обґрунтовано вастосування методу зрівняння при розв'язуванні дисперсійного рівняння.

6. Проведено чисельну оцінку обійзності алгоритму при вастосовуванні методу зрівняння, а також порівняння результатів, що були одержані за умовою граничного переходу до звичайної мікросмушкової лінії в аналогічними даними відомих робіт.

7. Чисельно досліджено вплив ребер смужкового провідника РСМЛ на поведінку постійних розповсюдження основної та вищих типів хвиль, а також на розподіл поля основної хвилі в поперечному перерізі структури. Виявлено зменшення дисперсії постійної розповсюдження основної моди і значне збільшення концентрації поля на щільностях, які утворені нижнім металевим екраном та ребрами провідника при зануренні останніх у діелектричну підкладку.

8. На основі використання розробленого узагальненого підходу до моделювання планарних хвилеведучих структур вперше побудовано строгий обчислювальний алгоритм і складено пакет прикладних програм для визначення постійних розповсюдження основних та вищих типів мод мікросмужкових ліній з лицевим типом зв'язку, які і використовують "підтримуючий" шар діелектрика під нижнім смужковим провідником. Показана можливість вастосування зрівняння при ро-

ов'язуванні дисперсійного рівняння задачі.

9. Проведено чисельну оцінку збіжності алгоритму при застосуванні методу зрівняння, а також порівняння результатів, які одержані за умовою граничного переходу до зв'язаних мікросмужкових ліній на "підвішеній" підкладці з аналогічними результатами відомих робіт.

10. Проведено чисельне дослідження поведінки постійних розповсюдження основних і вищих типів хвиль зв'язаних мікросмужкових ліній у широкому діапазоні зміни геометричних та матеріальних параметрів структури. Вивчена можливість впливу на співвідношення постійних розповсюдження робочих мод за рахунок зміни значень діелектричних проникністей шарів. Показано, що наявність "підтримуючого" шару дозволяє істотно зменшувати різницю між значеннями постійних розповсюдження робочих мод, що робить можливим розширення спектру пристроїв, які розробляються на основі мікросмужкових ліній з дещеvim зв'язком.

ПУБЛІКАЦІ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Прохода И.Г., Яковлев А.Б., Гвиленко А.Б. Некоторые приложения метода ЧПО для решения векторных спектральных задач электродинамики. - Днепропетровск: ДГУ, 1990. - 52 с.

2. Гвиленко А.Б., Прохода И.Г., Яковлев А.Б. Интегральные соотношения для решения векторных спектральных задач электродинамики // Методы и средства проектирования элементов РЭА. Сб. научн. тр. - Днепропетровск, 1989, с.77-80.

3. Гвиленко А.Б., Прохода И.Г., Яковлев А.Б. Интегральные уравнения для расчета волноведущих структур с продольным плоскостным заполнением // Методы и средства проектирования элементов РЭА. Сб. научн. тр. - Днепропетровск, 1989, с.81-85.

4. Прохода И.Г., Яковлев А.Б., Гвиленко А.Б. Некоторые приложения метода ЧПО для расчета собственных волн в многосвязных волноведущих структурах с продольным плоскостным заполнением. - Днепропетровск, 1989. - 46 с. - Деп. в ВИНТИ N 6619-B89.

5. Гвиленко А.Б., Дмитриук С.Г., Прохода И.Г., Яковлев А.Б. Двумерные в-торные интегральные формулы для решения задач с плоскостным диэлектрическим заполнением на собственные волны // Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных систем СВЧ на ОИС. Тезисы докладов. - Суваль, 1985, с.114.

6. Гниленко А.В. Расчет экранированной микрополосковой линии с внутренним проводником U-образной формы // Перспективы развития антенно-фидерной технологии и ее элементной базы. Тезисы докладов. — Суздаль, 1992, с.126.

7. Гниленко А.В. Полноволновый анализ микрополосковой линии с внутренним проводником сложной формы // Матер. 3-й Крымской конф. "СВЧ-техника и спутниковый прием", Севастополь, 1993, с.605-608.

8. Gnilenko A.B., Yakovlev A.B. Vector integral equations to the spectral analysis of monolithic microwave integrated circuits // Proc. of the 3rd Int. Symp. on Antennas and EM Theory, Nanjing, China, 1993, pp.841-844.

9. Gnilenko A.B. An application of the method of partial overlapping regions to the hybrid mode analysis of the microstrip-like line with H-configuration of the inner conductor // Abstracts of the 2.th URSI General Assembly, Kyoto, Japan, 1993, p.696.

10. Gnilenko A.B. Eigenmodes of the microstrip-like line with complex inner conductor shape // Proc. of the 10th Int. Microwave Conf., Ksiaz, Poland, 1994, pp.254-258.

11. Gnilenko A.B. A generalized approach to the hybrid mode analysis of planar wave-guiding structures // Proc. of the 15th URSI Int. Symp. on EM Theory, St.Petersburg, Russia, 1995, pp.108-110.

ЦИТОВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. — М.: Наука, 1985. — 256 с.

2. Jansen R.H., Arnold R.G., Eddison I.G. A comprehensive CAD approach to the design of MMIC's up to MM-wave frequencies // IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., 1988, v.36, N 2, pp.208-219.

3. Chang C.-N., Cheng J.-F. Fullwave analysis of multilayer microstrip lines // IEE Proc.-Microw. Antennas. Propag., 1994, v.141, N 3, pp.185-188.

4. Medina F., Horno M., Baudrad H. Generalized spectral analysis of planar lines on layered media including uniaxial and biaxial dielectric substrates // IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., 1989, v.37, N 3, pp.504-511.

5. Omar A.S., Schüneman K. Formulation of the singular integral equation technique for planar transmission lines // IEEE Trans. Microwave

Theory & Tech., 1985, v.33, N 12, pp.1313-1321.

6. Tzuang C.-K.C., Tseng I.-D. A full-wave mixed potential mode-matching method for the analysis of planar or quasi-planar transmission lines // IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., 1991, v.39, N 10, pp.1701-1712.

7. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А. Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции. — Киев: Наук. думка, 1984. — 296 с.

8. Заргано Г.Ф., Лерер А.М., Ляпин В.П., Синявский Г.П. Линии передачи сложных сечений. — Ростов: Изд. РГУ, 1983. — 320 с.

9. Прохода И.Г., Чумаченко В.П. Метод частичных пересекающихся областей для исследования волноводно-резонаторных систем сложной формы // Изв. вузов. Радиофизика, 1973, т.16, N 10, с.1578-1581.

10. Tai C.T. Dyadic Green's functions in electromagnetic theory. — PA: Intext Educational Publishers, 1971. — 242 p.

11. Марков Г.Т., Васильев Е.Н. Математические методы прикладной электродинамики. — М.: Сов. радио, 1970. — 120 с.

12. Комарь Г.И., Шестопалов В.П. Цилиндрические и зеркально-щелевые линии // Радиотехника и электроника, 1987, т.32, N 7, с.1345-1366.

13. Нефедов Е.И., Уткин М.И., Черникова Т.Ю. Реберная несимметричная щелевая линия // Радиотехника и электроника, 1992, т.37, N 8, с.1432-1441.

14. Kawano K. Hybrid-mode analysis of a broadside-coupled microstrip line // IEE Proc.-H, Microw. Antennas Propag., Feb. 1984, v.131, N 1, pp.21-24.

ЛНБ им. В. Стефанюка
АН України

Гниленко А.Б. Моделирование планарных волноведущих структур для объемных интегральных схем сверхвысоких частот.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика.

Днепропетровский государственный университет.

Защищается 11 научных работ, которые содержат результаты теоретического исследования, посвященного моделированию планарных волноведущих структур для ОИС СВЧ. Представлен строгий подход к полноволновому анализу планарных многослойных линий передачи с проводниками конечной толщины. На основании применения разработанного подхода в рамках метода частичных пересекающихся областей исследованы характеристики двух волноведущих структур: реберной микрополосковой линии и связанных микрополосковых линий с "поддерживающим" слоем. Выявлены свойства рассмотренных линий передачи, позволяющие эффективно использовать данные структуры в качестве базовых элементов ОИС СВЧ.

Gnilenko A.B. Modelling of planar waveguiding structure. for monolithic microwave integrated circuits.

The thesis for obtaining the candidate degree in physics and mathematics with major in 01.04.03 – radiophysics.

Dnepropetrovsk State University.

11 scientific papers, which contain results of research on the modelling of planar waveguiding structures for MMIC applications, are defended. The thesis presents a generalized approach to the hybrid mode analysis of shielded multilayered planar transmission lines with finite metallization thickness. Based on the method of overlapping regions, the approach has been applied to the characterization of two waveguiding structures, namely the rib-microstrip line and the broadside-coupled microstrip lines with the "supporting" layer. Numerical results reveal specific properties of the structures under consideration which may be used in the design of MMIC building blocks.

Ключові слова:

об'ємні інтегральні схеми НВЧ, планарні лінії передачі, метод часткових перетинних областей, інтегральні зображення, діадні функції Гріна, постійна розповсюдження, ефективна діелектрична проникність.

м.п. ДГУ зак 259-100.

AB 34.039