

УДК 621.372.2

О. Б. Гниленко

Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЩІЛИННОГО ПЕРЕХОДУ МІЖ МІКРОСМУЖКОВИМИ ЛІНІЯМИ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ РІЗНИЦЬ

Методом скінчених різниць у часовій області проведено електродинамічне моделювання переходу між двома мікросмужковими лініями, який можна розглядати в якості одного з базових елементів об'ємних інтегральних схем СВЧ. Досліджувана чотирьохшарова електродинамічна структура утворена мікросмужковими лініями, що нанесені на діелектричні підкладки, які з'єднані одна з одною металевим заземленим екраном. Електромагнітний зв'язок між лініями здійснюється за допомогою напівхвилевого резонатора на щілинній лінії, яку створено у спільному екрані під прямим кутом до смужок. Збуджується структура імпульсним сигналом, що розповсюджується вздовж однієї з мікросмужкових ліній. Електромагнітна взаємодія між лініями в області перекриття смужок та щілини дозволяє передати сигнал у вертикальній площині на інший шар об'ємної інтегральної схеми СВЧ. На основі розв'язання дискретизованих рівнянь Максвелла з врахуванням граничних і початкових умов складено обчислювальний алгоритм та відповідну комп'ютерну програму на алгоритмічній мові Фортран. Одержано чисельні результати у часовій та частотній області. Результати розрахунків у часовій області дозволяють наочно відобразити процес поширення та дифракції імпульсного сигналу на досліджуваному переході. На основі результатів у часовій області одержано частотно-залежні характеристики пристрою, а саме – дисперсійні характеристики елементів матриці розсіювання. Визначено робочий діапазон частот досліджуваного щілинного переходу між шарами об'ємної інтегральної схеми. Розроблений обчислювальний алгоритм та пакет програм може бути використано при проектуванні елементів об'ємних інтегральних схем СВЧ.

Ключові слова: мікросмужкова лінія, щілинна лінія, метод скінчених різниць.

Методом конечных разностей во временной области проведено электродинамическое моделирование перехода между двумя микрополосковыми линиями, который можно рассматривать в качестве одного из базовых элементов объемных интегральных схем СВЧ. Исследуемая четырехслойная электродинамическая структура образована микрополосковыми линиями, которые нанесены на диэлектрические подложки, соединенные одна с другой металлическим заземленным экраном. Электромагнитная связь между линиями осуществляется при помощи полуволнового резонатора на щелевой линии, которая создана в общем экране и направлена под прямым углом к полоскам. Возбуждается структура импульсным сигналом, который распространяется вдоль одной из микрополосковых линий. Электромагнитное взаимодействие между линиями в области перекрытия полосок и щели позволяет передать сигнал в вертикальной плоскости на другой слой объемной интегральной схемы СВЧ. На основе решения дискретизированных уравнений Максвелла с учетом граничных и начальных условий разработан вычислительный алгоритм и соответствующая компьютерная программа на алгоритмическом языке Фортран. Получены численные результаты во временной и частотной области. Результаты расчетов во временной области позволяют наглядно отобразить процесс распространения и дифракции импульсного сигнала в исследуемом переходе. На основе результатов во временной области получены частотно-зависимые характеристики устройства, а именно – дисперсионные характеристики элементов матрицы рассеяния. Определен рабочий диапазон частот исследуемого перехода между слоями объемной интегральной схемы. Разработанный вычислительный алгоритм и пакет программ может быть использован при проектировании элементов объемных интегральных схем СВЧ.

Ключевые слова: полосковая линия, щелевая линия, метод конечных разностей.

Interlayer microstrip to microstrip line interconnection for microwave monolithic integrated circuits is analyzed based on the finite-difference time-domain method. The interconnection can be regarded as a basic element of microwave monolithic integrated circuits. Four-layered electromagnetic structure, to be investigated, is formed of microstrip lines, which deposited on dielectric substrates connected each other by means of metallic grounded shield. Electromagnetic coupling between lines is possible through half-wave slot line resonator in common shield, which oriented normally to the strips. The structure is excited with a pulse signal propagated along one of the microstrip lines. Electromagnetic interaction between lines in the area of strips and slot overlapping allows us to transfer the signal in vertical direction to another layer of the microwave monolithic integrated circuit. Based on the solution of the discretized Maxwell equation taking into account boundary and initial conditions, computational algorithm and corresponding Fortran program are developed. Numerical results are obtained in time and frequency domain. Calculations in time domain allow us to visualize the process of a pulse signal propagation and diffraction in the analyzed interconnection. Based on time domain results frequency-dependent characteristics of the device are obtained, namely dispersion characteristics of the scattering matrix elements. Working frequency band of the investigated interconnection through monolithic integrated circuit layers is determined. Developed computational algorithm and program package can be used for computer aided design of microwave monolithic integrated circuit elements.

Key words: microstrip line, slot line, finite-difference method.

Вступ

Задачі мініатюризації електронного обладнання, підвищення швидкості передачі та обробки інформації обумовлюють перехід у комп'ютерній техніці та системах зв'язку до частот, що відповідають НВЧ діапазону. Розв'язання таких задач, вочевидь, лежить у площині поширення використання об'ємних інтегральних схем (ОІС) НВЧ. Усе це ставить перед розробниками фундаментальні проблеми моделювання поширення імпульсних сигналів у складних електродинамічних структурах, оцінювання електромагнітного зв'язку та електромагнітної сумісності, перетворення сигналів за рахунок електромагнітної взаємодії між різноманітними лініями передачі НВЧ діапазону, що складають ОІС. Дослідження та розв'язок таких проблем можливі лише за допомогою вискоєфективних та адекватних методів математичного моделювання реальних фізичних процесів.

Теоретичні положення

Одним з найбільш перспективних методів моделювання елементів ОІС НВЧ на цей час вважається метод скінчених різниць у часовій області, який відрізняється від інших значною гнучкістю та універсальністю, здатністю одержувати не тільки частотні характеристики електродинамічних структур але і дослідити еволюцію імпульсних сигналів під час їх поширення та розсіювання, що дозволяє знайти фундаментальні закономірності та властивості досліджуваних явищ та об'єктів.

Метод скінчених різниць у часовій області [1] базується на поділенні області визначення поля на елементарні кубічні комірки і обчисленні значень компонент електричного та магнітного векторів у вузлах просторової сітки, що утворюється, в послідовні моменти часу [2]. Пряме дискретизування рівнянь Максвелла із застосуванням центрально-різницевої апроксимації зводить їх до системи алгебраїчних рівнянь відносно компонент електричного та магнітного полів у вузлах сітки. Електричне та магнітне поля по чергово розраховуються одне через друге в усіх вузлах сітки при просуванні за часовими шарами, що дозволяє змоделювати процес проходження імпульсного сигналу в досліджуваній електродинамічній структурі.

Розглянемо процес поширення імпульсного сигналу в щілинному переході між двома мікросмужковими лініями, що знаходяться в двох різних шарах об'ємної інтегральної схеми. Чотирьохшарова електродинамічна структура, що розглядається, утворена мікросмужковими лініями, які нанесені на діелектричні підкладки, з'єднані одна з одною металевим заземленим екраном. Для зв'язку між лініями в екрані зроблено щілину, що прямує під прямим кутом до смужок (рис.1). Мікросмужкові лінії закінчуються чвертьхвильовими розімкнутими шлейфами. Таким чином, між мікросмужковими лініями, що знаходяться в різних шарах схеми, здійснюється електромагнітний зв'язок за допомогою напівхвильового резонатора на щілинній лінії, який реалізовано у спільному екрані. Збуджується така структура імпульсним сигналом, який розповсюджується вздовж однієї з мікросмужкових ліній. Електромагнітна взаємодія між лініями в області перекриття смужок та щілини дозволяє передати сигнал у вертикальній площині на інший шар об'ємної інтегральної схеми НВЧ, одночасно здійснюючи його фільтрацію. Металеві екрани та смужки вважаються такими, що не мають втрат. Товщина смужок та екранів є нескінченно малими. Тобто, всі провідники в області аналізу можуть бути введені до обчислювального алгоритму, якщо тангенціальні компоненти електричного поля в містах розташування провідників встановити такими, що дорів-

нують нулю. Тангенціальні компоненти електричного поля на границях області обчислення задовольняють абсорбуючим умови Мура першого порядку [3]. На основі дискретизованих рівнянь Максвелла, граничних і початкових умов легко скласти обчислювальний алгоритм за так званою leap-frog схемою, яка є традиційною для метода скінчених різниць у часовій області.

Чисельні результати

За відповідним обчислювальним алгоритмом складено комп'ютерну програму і проведено чисельне моделювання проходження імпульсного сигналу скрізь перехід. Результати розрахунків у часовій області зображено на рис.2 в один і той же момент часу для компонентів електричного поля в трьох площинах: безпосередньо під смужками в діелектричних підкладках та на щілині. У верхній площині під вхідною смужкою видно сигнал, що відбився від неоднорідності і прямує в бік вхідного плеча, а також сигнал, який пройшов область переходу і відбився від розімкнутого кінця мікросмужкової лінії. Середня площина рисунку демонструє сигнал, який збуджується у відрізьку щілинної лінії і розповсюджується в напрямку її кінців. У нижній площині зображено сигнал, який пройшов до нижнього шару об'ємної інтегральної схеми і прямує у вихідне плече. Чисельні результати у часовій області дають підставу одержати частотно-залежні характеристики переходу, якщо застосувати до них Фур'є перетворення. Відповідні дисперсійні залежності для елементів матриці розсіювання зображені на рис.3. Поле відбитої хвилі розра-

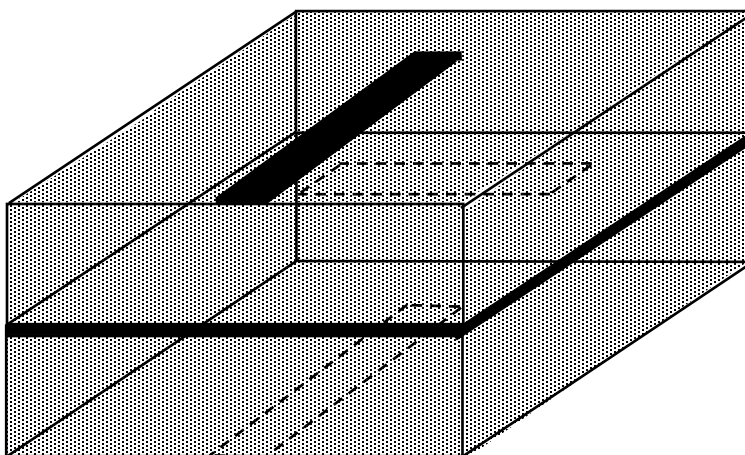


Рис.1. Щілинний перехід між мікросмужковими лініями

ховується в цьому разі як різниця між повним полем мікросмужкової лінії та полем збуджуючої хвилі. Поле збуджуючої хвилі одержано як результат скінченорізницевого моделювання регулярної мікросмужкової лінії. З рисунку видно, що щілинний перехід як з'єднання з електромагнітним типом зв'язку має частотно-селективні властивості і крім переводу сигналу в інший шар ОІС може використовуватися в якості смуго-пропускного фільтра. Слід зауважити, що на такому міжшаровому щілинному переході, або на ланцюгу подібних переходів можна побуду-

О. Б. Гниленко
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЩІЛННОГО
ПЕРЕХОДУ МІЖ МІКРОСМУЖКОВИМИ ЛІНІЯМИ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ РІЗНИЦЬ

вати дуже компактні фільтри НВЧ, що цілком узгоджується з концепцією мініатюризації радіоелектронної апаратури.

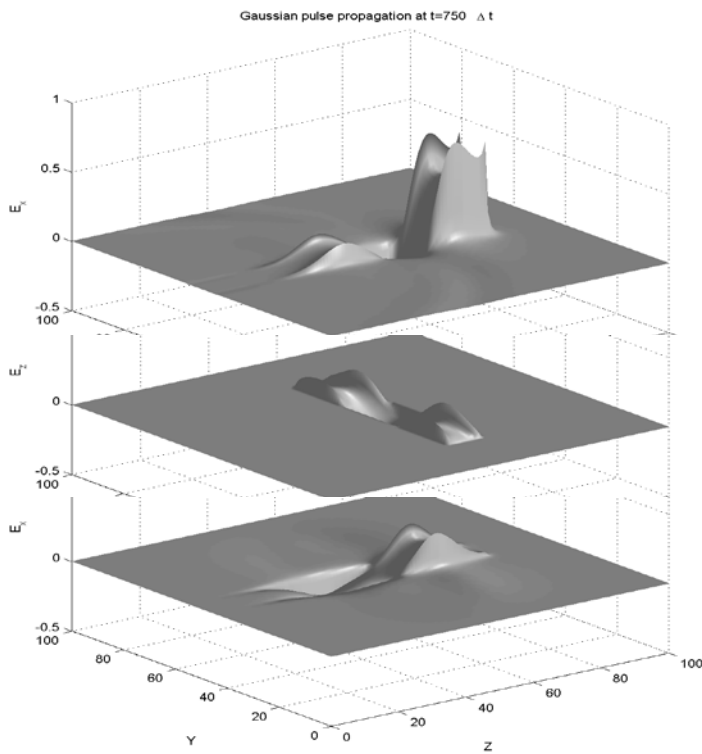


Рис.2. Моделювання проходження сигналу в часовій області

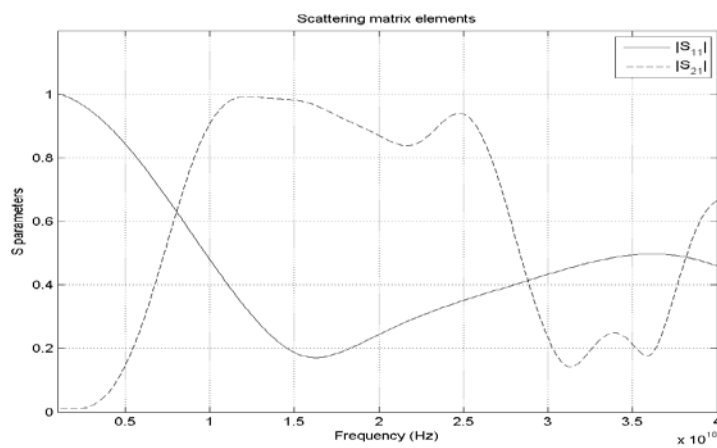


Рис.3. Залежність елементів матриці розсіювання від частоти

Висновки

Проведено електродинамічне моделювання переходу між двома мікросмушковими лініями, що належать до різних шарів об'ємної інтегральної схеми НВЧ і мають електромагнітний зв'язок через напівхвильовий резонатор на щільній лінії у спільному екрані. Розроблений обчислювальний алгоритм та програмний пакет може бути використано при проектуванні елементів ОІС НВЧ.

Бібліографічні посилання

1. **Yee K. S.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media/ K. S. Yee // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1966.– V. AP-14.– № 5.– P. 302 – 307.
2. **Zhang X.** Time-domain finite difference approach to the calculation of the frequency-dependent characteristics of microstrip discontinuities/ X. Zhang, K. K. Mei // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1988.– V. MTT-36.– № 12.– P. 1775 – 1787.
3. **Mur G.** Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equation/ G. Mur // IEEE Trans. Electromagn. Compat.– 1981.– V. EMC-23. – № 4.– P. 377 – 382.

Надійшла до редколегії 15.01.2010