

31. Technology Roadmap for Nanoelectronics /Ed/ R.Compano //2000 European Commission 1ST programme Future and Emerging Technologies 104 P.

Ключові слова: молекулярна електроніка, напівпровідникові вироби, інтегральні схеми	
Руденко Н.М., Сілакова Т.Т.	Rudenko N.M., Silakova T.T.
Молекулярна електроніка: теперішнє і майбутнє	Molecular Electroics: Present And Future
Наданий огляд літератури в галузі молекулярної електроніки відображує теоретичні аспекти провідності молекул та їх використання в приладах та інтегральних схемах	Brief review of the literature is submitted in the field of molecular electronics, which reflects theoretical aspects of conductivity of molecules, and also their use in separate devices and integrated circuits.

УДК 621.317

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ

Вунтесмері В. С., Комарова О. П., Осінов А. М.

Розглянуто методи дослідження структури поля в електродинамічних системах закритого та відкритого типів, що дозволяє встановити тип коливань резонаторів, визначити амплітуди різних типів хвиль в хвилеводах, оцінити вплив неоднорідностей, розрахувати склад просторових гармонік поля в розкривах антен.

Дослідження структури електромагнітного поля в хвилеведучих структурах та резонаторах є актуальною задачею, яка виникає при розробці вузлів хвилеведучих структур при одномодовому і особливо при багатомодовому режимах поширення електромагнітних хвиль. Дослідження структури електромагнітного поля дозволяє встановити тип коливань резонаторів, визначити амплітуди різних типів хвиль, оцінити вплив неоднорідностей на структуру поля, розрахувати склад просторових гармонік поля в розкривах антен, виявити, а потім усунути дефекти виробництва вузлів антенно-фідерного тракту. Окремою актуальною задачею є дослідження розподілу електромагнітного поля на місцевості і в приміщеннях міст і населених пунктів в зв'язку з постійно зростаючою густиною радіовипромінюючих пристроїв, що обумовлює утворення так званого електромагнітного «смогу». В цій роботі розглянуті порівняльні характеристики різних методів дослідження структури електромагнітного поля в електродинамічних системах закритого та відкритого типів.

Методи дослідження структури поля

На сьогодні існує чимало методів дослідження структури поля в складних електродинамічних системах. В закритих хвилевідних системах і резонаторах структуру електромагнітного поля досліджують *методом активного зонду* [2], наприклад, електричним (штир) або магнітним (екранована петля) зондом через отвори в стінках хвилеводу або резонатора. Електричним або *ємнісним зондом* [4] вимірюється розподіл електричної складової електромагнітного поля. Покриття із феромагнітного поглинаючого матеріалу, нанесене на зовнішній провідник підвідної лінії, додатково подавляє паразитні хвилі. У вимірюваному пристрої за допомогою генератора стандартних сигналів (ГСС) збуджуються електромагнітні коливання. В облас-

ті вимірювання розміщується електричний зонд. Він представляє собою відрізок тонкого дроту довжиною менше довжини хвилі коливань, що досліджуються. Вихідна напруга такого зонду пропорційна компоненті електричного поля, що паралельна напрямку штиря зонду. Вирахування напруги на зонді і потужності в ланцюгу зонду дає точні результати в тому випадку, якщо зонд розглядається як приймальна антена з відповідним значенням ефективної поверхні. Але затухання в підвідному кабелі, як правило, істотне і ним не можна нехтувати при обробці результатів вимірювання. Магнітні або *зонди індуктивного типу* [4] звичайно мають форму несиметричних петель частіше всього круглих або заокруглених. Використовуються для вимірювання напруженості магнітного поля електромагнітних хвиль. Вимірювання за допомогою індуктивних зондів показали, що напруга зонду має компоненту, що пропорційна електричному полю, при чому вона має той же порядок величин, що й магнітна. Таким чином, петля представляє собою зонд змішаного індуктивно-ємнісного типу. Необхідно компенсувати ємнісну компоненту напруги, наприклад, за допомогою екрануючої скоби. В обох методах наведений НВЧ-сигнал детектується детектором, і потім його значення реєструється індикатором. В якості індикатора можуть застосовуватись гальванометри, мікроамперметри, чутливі вольтметри та ін. Зонд вводиться у внутрішню порожнину вимірюваного пристрою через невидпромінюючі отвори або щілину. Його розміри, а також розміри додатково прорізаних отворів і щілин мають бути такими, щоб структура поля, що вимірюється, мало спотворювалась і додаткові втрати і реактивності, що вносяться у пристрій, були досить малими. Таким методом можна проводити вимірювання тільки безпосередньо на стінках хвилеводу або резонатора, щоб уникнути впливу провідників зонда на структуру вимірюваного поля. Вимірювання розподілу поля в об'ємі електродинамічної системи і в відкритих системах (наприклад, в мікροстрічкових лініях передачі) супроводжується великими похибками за рахунок впливу провідників зондів. Дещо зменшити вплив провідників можна зробивши їх *високоомними* [8], що й використовується в *методі зонду з високоомною підводкою*. Зонд представляє собою електричний або магнітний диполь малих розмірів. Диполь зібраний разом з кристалічним детектором в зондовій голівці з полістиролу і зв'язаний за допомогою вивідних високоомних провідників з індикатором, що знаходиться за порожниною. Вивідні провідники виконані у вигляді тонких смужок із високоомної вугільної пасти, що нанесені на кварцову трубку.

Розроблено ряд методів вимірювання розподілу полів, в яких застосовуються спеціальні *пробні тіла*, що вносять задане збурення у вимірюване поле [4]. Метод застосовується для досліджень розподілу поля в електромагнітних резонаторах і хвилеводах. В якості пробних тіл використовуються діелектричні, феромагнітні і металеві кульки. Розподіл поля можна отримати, вимірюючи залежність резонансної частоти порожнин від поло-

ження пробних тіл. Метод також отримав назву *метод малих збурень* [1]. При вимірюваннях структури електромагнітного поля в хвилеводі останній закорочується і перетворюється в резонатор. Для того, щоб поле такого резонатора відповідало полю пристрою в робочому режимі, необхідно, щоб він мав достатньо велику електричну довжину порядку декілька довжин хвиль. Цій умові, як правило, легко задовольняють сповільнюючі системи електровакуумних пристроїв НВЧ, при дослідженні яких даний метод частіше всього використовується. Щоб не порушувати структури вимірюваного поля і отримувати необхідну роздільна здатність, реактивний зонд має мати геометричні розміри значно менші довжини хвилі і сферичну або циліндричну форму. При вимірюваннях резонатор збуджується за допомогою слабо зв'язаного елемента зв'язку. Конструкція і розміщення елемента зв'язку мають забезпечувати переважне збудження електромагнітної хвилі необхідного типу. За допомогою іншого елемента зв'язку, також слабо зв'язаного з резонатором і реагуючого переважно на хвилю необхідного типу, НВЧ-коливання знімаються з резонатора і підводяться до детектора. Під час вимірювань реактивний зонд за допомогою тонкої нитки і механічного застосування переміщують всередині резонатора, що викликає зміну його резонансної частоти. В кожному новому положенні зонду ГСС налаштовується на нову резонансну частоту досліджуваного макету. За допомогою хвилеміру вимірюють зміну резонансної частоти відносно резонансної частоти макету при відсутності зонду і визначають величину, пропорційну напруженості електричного поля у вимірюваній точці. Потім по виміряним точкам будують епюру залежності електричної складової поля вздовж напрямку переміщення зонду. Цей метод отримав назву *метод реактивного зонду* [2]. Недоліком методу при застосуванні його для хвилеводів є те, що збурюючи тіла повинні мати досить великі розміри, а це зменшує точність їх позиціонування.

Метод поглинаючого зонду [5]. Метод заснований на вимірюванні втрат, що вносяться поглинаючим зондом в тракт, в якому досліджується розподіл поля. Або іншими словами – на вимірюванні поглинання НВЧ енергії зразком, що має явно виражені діелектричні або магнітні втрати. Втрати у зразку прямо пропорційні квадрату напруженості електричного поля (якщо зонд має електричні втрати) або магнітного поля (якщо має магнітні) і залежать від положення поглинаючого тіла. Надаючи поглинаючому тілу визначену форму, можна знайти окремі компоненти поля. Така методика придатна як для біжучих, так і для стоячих хвиль. і дозволяє знімати розподіл полів, якщо зонд орієнтований визначеним способом. В випадку біжучих хвиль вимірюють коефіцієнт передачі відрізка хвилеводу, а в випадку стоячих хвиль треба вимірювати добротність отриманого резонатора. Труднощі реалізації методу полягають у вимірюванні дуже малих втрат з необхідною точністю.

Існують *автоматизовані адаптивні комплекси* [12] для оперативної ре-

естрації та аналізу амплітудно-фазового розподілу ВВЧ поля в розкривах хвилевідних структур. Генератор через основний тракт направлено поляризаційного розділювача здійснює збудження досліджуваного хвилеводу, на розкриві якого формується багатомодовий АФР досліджуваного поля. Вимірювання здійснюється шляхом реєстрації розсіяного зондом поля назад у хвилевід. Перевідбитий зондом потік електромагнітної енергії пройшовши багатомодовий хвилевід в зворотному напрямку, поступає в направлений поляризаційний розділювач. З виходів допоміжних трактів направлено поляризаційного розділювача дві ортогональні поляризаційні компоненти поля, що аналізується, поступають на перші входи суматорів. Опорний сигнал генератора подається на другі входи через фазообертачі та атенюатори, регулюючи які компенсуємо фонову складову. Таким чином, з виходів суматорів на сигнальні входи ампліфазометрів надходять ортогонально-поляризовані компоненти поля, що аналізується. З ампліфазометрів сигнал поступає на синхронні детектори. Далі детектовані квадратурні компоненти подаються на ПК, де з їх допомогою реєструється амплітуда і фаза поля, що вивчається. Лінійна швидкість переміщення зонду, час переходу до наступного значення опорного каналу регулюється в широких межах алгоритмами, що визначаються користувачем.

Метод дослідження електромагнітних систем за допомогою *низькочастотних аналогових кіл* [4] має усі переваги, що характерні для низькочастотних вимірювань. Хвильові процеси в лініях і хвилеводах допускають їх моделювання за допомогою котушок індуктивності та конденсаторів. Ці переваги заключаються в простоті методів генерації, підсилення і перемикання сигналів, у високих вхідних опорах ламп, простоті вимірюваних операцій, високій надійності і відтворенні результатів. Метод моделювання може бути з успіхом застосований до дослідження розподілу полів у системах зі складною геометрією. Він дозволяє створити зосереджені аналогі довільних перерізів хвилеводів, хвилевідних згинів та інших неоднорідностей і вивчити розподіл поля в подібних системах на основі низькочастотних вимірювань. Добротність котушок індуктивності і конденсаторів повинна бути якомога більша, щоб втрати в них не призвели до невідповідності затухаючого процесу в моделі і ідеального процесу поширення незатухаючих хвиль в вільному просторі.

Для дослідження розподілу статичних та квазістатичних електричних полів використовується *метод електролітичної ванни* [2]. В діапазоні НВЧ цим методом досліджується структура поля хвилі, що є квазістатичною. В цьому випадку, вимірявши розподіл статичного поля в НВЧ-пристрої, можна стверджувати, що структура цього поля буде однаковою зі структурою поля Т-хвилі в цьому ж пристрої. Вимірювання зводиться до визначення і окреслення форми еквіпотенціальних ліній електричного поля між електродами, що знаходяться в діелектричній ванні, заповненій водою. Електроди пропорційні за розмірами і однакові за формою з металевими поверх-

нями перерізу вимірюваного пристрою. До них підключено джерело постійної або низькочастотної змінної напруги. Для вимірювання потенціалів використовують вольтметр з великим входним опором. Будуються лінії еквіпотенціальних поверхонь, а потім рисується структура електромагнітного поля, оскільки електричні силові лінії перпендикулярні еквіпотенціальним поверхням, а магнітні – співпадають з ними.

Волоконно-оптичний зонд електромагнітного поля [6]. Це пристрій для зондування поля як в об'ємах так і на поверхні хвилеведучих структур і резонаторів. Діелектричне оптоволокло мало спотворює структуру вимірюваного поля. Містить чутливий провідний елемент, виконаний так, щоб його можна було вставити в корпус і отримати сигнал, що показує величину електромагнітного поля; підсилювач, що має вхід, зв'язаний з чутливим провідним елементом і працюючий так, щоб забезпечити на виході перетворення напруги в струм з визначеним коефіцієнтом; діодний світло випромінювач, зв'язаний з виходом вказаного підсилювача і призначений для того, щоб забезпечити світловий сигнал, який відповідає сигналу, отриманому в чутливому провідному елементі; волоконно-оптичний кабель, перший кінець якого розташований так, щоб приймати вказаний світловий сигнал від світло випромінювача і передавати його на другий кінець кабелю. Більш досконалим методом є метод високоточного вимірювання розподілу з використанням поляризаційно-стабілізованого магнітооптичного зонду [7]. Установка містить мініатюрний магнітооптичний (МО) кристал, який, під дією магнітного поля, змінює поляризацію світла, що через нього проходить. Із поляризаційного контролера лінійно поляризоване світло через оптоволокло поступає на зонд. Сфокусований лінзою потік направляється призмою на МО кристал. Світло змінює кут поляризації відповідно до величини магнітного поля. Потім воно спрямовується призмою на аналізатор, що містить площину, що повертається, яка перетворює поляризаційний кут в оптичний сигнал. Цей сигнал фокусується лінзою і поступає з зонду через оптоволокло на фотодіод. Фотодіод конвертує оптичний сигнал в радіочастотний, який вимірюється за допомогою відповідного аналізатора. Аналізатор розташовується в зонді для мінімізації нестабільності точності вимірювань, що пов'язані з нестабільністю параметрів оптоволокла (залежність від температури, вібрації, перегинів тощо).

Якщо вимірювати розподіл *зондом з нерухомими диполями* [8, 11], то достатньо двох взаємно перпендикулярних диполів, розташованих у площині, що вивчається. За показами індикаторів диполів, можна знайти проекцію шуканого вектора на дану площину. Такий зонд з двома взаємно перпендикулярними «схрещеними» диполями називають «схрещеним зондом». Вимірявши за допомогою цього зонду проекції шуканого вектора на дві площини, положення яких відоме, можна за допомогою простих геометричних побудов знайти вектор поля в об'ємі. Але досліди показують, що вимірювання полів схрещеними зондами призводять до неточних резуль-

татів через наявність зв'язку по низькій частоті між каналам диполів.

При вимірюваннях електромагнітного поля, модульованого по амплітуді зі звуковою частотою, виявилось доцільним проводити вимірювання за допомогою зонду з одним диполем, вісь якого нахилена до осі підводки під кутом 45° [8]. Розташовуючи диполь у досліджуваній площині і повертаючи його навколо осі підводки на 180° , можна визначити проекцію вектора поля на площину, що вивчається. До недоліків методу вимірювання зондами з нерухомими диполями відноситься неоднозначність визначення шуканого вектора.

Вивчення полів за допомогою зонда із диполем, що обертається [8]. Диполь має можливість обертатися навколо двох осей. Розміщуючи диполь в об'ємі так, щоб індикатор давав весь час максимальні або мінімальні покази і знаючи положення осі диполя, можна визначити вектор поля в будь-якій точці об'єму. Але цей метод призводить до ускладнення конструкції зонду і вимірювальної установки, через що точність вимірювань може знизитись. Цим способом можна вивчати конфігурацію електромагнітного поля в порожнинах довільної форми, що збуджуються на будь-якій, як резонансній, так і не резонансній частоті.

Метод магнітного зонду на основі феромагнітного резонансу [9,10]. В якості феритового резонатора використовується магнітний зонд в вигляді феритової кульки малого діаметру намагніченої до насичення зовнішнім магнітним полем в режимі феромагнітного резонансу. Такий резонатор із монокристалу залізо-іттрієвого гранату (ЗІГ) має високу добротність (декілька тисяч) і при малому діаметрі вносить значне збурення електромагнітного поля, яке можна легко зафіксувати. Малі розміри феритового резонатора забезпечують точне визначення його положення в електродинамічній системі а відсутність будь яких провідників мало впливає на структуру вимірюваного електромагнітного поля. Взаємодія феритового резонатора з електромагнітним полем електродинамічної системи відбувається через магнітну складову кругової поляризації правого обертання відносно напрямку зовнішнього магнітного поля. Метод магнітного зонду на основі феромагнітного резонансу може бути використаний для дослідження структури полів в діелектричних резонаторах, діелектричних хвилеводах, в мікροстрічкових [10] та компланарних лініях, в хвилеводах з неоднорідним діелектричним заповненням та в багатомодових хвилеводах. Виключенням є феритові прилади НВЧ діапазону, наприклад, вентиля, циркулятори, які мають власне стале магнітне поле.

Проведений огляд методів дослідження структури електромагнітного поля в електродинамічних системах показує, що, хоча задача і її вирішення є важливим та необхідним питанням, досліджень в даній галузі проведено небагато і велися вони ще в середині минулого сторіччя. Переважно методи базуються на вимірюваннях за допомогою електричного зонду у вигляді штиря або магнітного зонду у вигляді петлі. В подальшому ці методи лиш

удосконалювались – збільшувалась точність та достовірність тощо. На початку 90-х в зв'язку з розвитком оптоволоконної техніки, був запропонований метод з використанням волоконно-оптичного зонду, удосконаленням якого став метод, що базується на ефекті Фарадея в магнітоактивних кристалах. Метод магнітного зонду на основі феромагнітного резонансу має підвищену точність позиціонування і може бути використаний для дослідження структури полів в складних електродинамічних системах

Література

1. Вольман В. И., Пименов Ю. В. Техническая электродинамика.-М.:Связь, 1971. - 432 с.
2. Конструирование СВЧ-устройств и экранов/ Под ред. А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.
3. Чернушенко А. М., Майбородин А. В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн/ Под ред. А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
4. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах: Пер. с нем./Под ред. В. Н. Сретенского. – М.: Гос. изд-во физико-математ. лит-ры, 1963. – 364 с.
5. Исследование полей в волноводах методом поглощающего зонда. Курушин Е.П., Недовесов В.Н. «Ученые записки Куйбышевского государственного педагогического института», 1965, вып. 49, ч.1, с. 117-126.
6. Волоконно-оптический зонд для измерения напряженности электромагнитного поля. Пат. 4928067 США, МКИ⁵ G 01 R 33/12. Опубл. 22.5.90; НКИ 324/96.
7. Highly-accurate Measurement of Current Distribution Using Polarization-stabilized MO Probe / Shin Nakamatsu, Ryo Yamaguchi and Shinji Uebayashi // Collaboration Projects DoCoMo R&D Technical Journal, vol.8, #3, p.50-54.
8. А.С. Бондарев Разработка метода исследования электромагнитных полей в полостях на моделях с помощью зонда с высокоомной подводкой, диссерт., 1955.
9. Вунтесмери В.С., Бульба О.П., Осипов А.М. Дослідження структури поля в електродинамічній системі методом магнітного зонду. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія-Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2007. – Вип.34. – с.118-123.
10. Rothe L., Experimentell Ermittlung der magnetischen Feldverteilung auf einer Microstrip-Leitung mittels Storkorpermessungen, Vortage der 2. Internationalen Konferenz uber Mikrowellenferrite, v. 23. bis 27. september 1974, pp. 350-376.
11. Kanda,M. and Ries, F.X. “Dipole-Based EM Probe Grabs Complex Fields”, Microwaves, January 1981, pp. 63-66.
12. Борисов Д.Н., Власов Б.И., Нечаев Ю.Б. Адаптивный комплекс для оперативной регистрации и анализа амплитудно-фазового распределения КВЧ поля в раскрытых волноведущих структур//Вестник Воронежского государственного университета. Физика. Математика, 2005, № 1.

Ключові слова: електродинаміка, електромагнітне поле, НВЧ-пристрої	
Вунтесмери В.С., Комарова О.П., Осипов А.М.	Vuntsemeri V.S., Komarova O.P., Osipov A.M.
Методы исследования структуры электромагнитного поля в электродинамических системах	The research methods of the electromagnetic field in electrodynamic systems
Рассмотрены методы исследования структуры поля в электродинамических системах закрытого и открытого типов, что позволяет определить тип колебаний резонаторов, амплитуды типов волн в волноводах, оценить влияние неоднородностей на структуру поля, рассчитать состав пространственных гармоник поля в раскрытых антенн.	Methods of a field of electrodynamic systems of the closed and opened types structure are observed, wich allows to define oscillation mode of resonators, to define amplitudes of different types of waves in waveguides, to estimate influence discontinuity on structure of an electromagnetic field, to count composition of space harmonics of a field in antennas mouth.