

Д.В. Гаврілов, аспір.

С.А. Ліщенко

М.А. Філінюк, д.т.н., проф.

Вінницький державний технічний університет

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗСТРУКТУРНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

Розглядаються методи вимірювання параметрів безструктурних моделей багатоелектродних напівпровідникових структур, які, в свою чергу, можна розділити на стандартні методи вимірювання параметрів у режимі короткого замикання (КЗ) і холостого ходу (ХХ), стандартні методи вимірювання параметрів при фіксованому навантаженні і нестандартні методи вимірювання параметрів.

Якість проектування різних видів електронних пристроїв значною мірою залежить від точності їх математичних моделей. Застосовувані в таких пристроях багатоелектродні напівпровідникові структури (біполярні і польові транзистори, тиристори, двобазові діоди тощо) прийнято описувати системами параметрів, вимірюваних як на постійному струмі, так і в діапазоні частот (рис. 1).

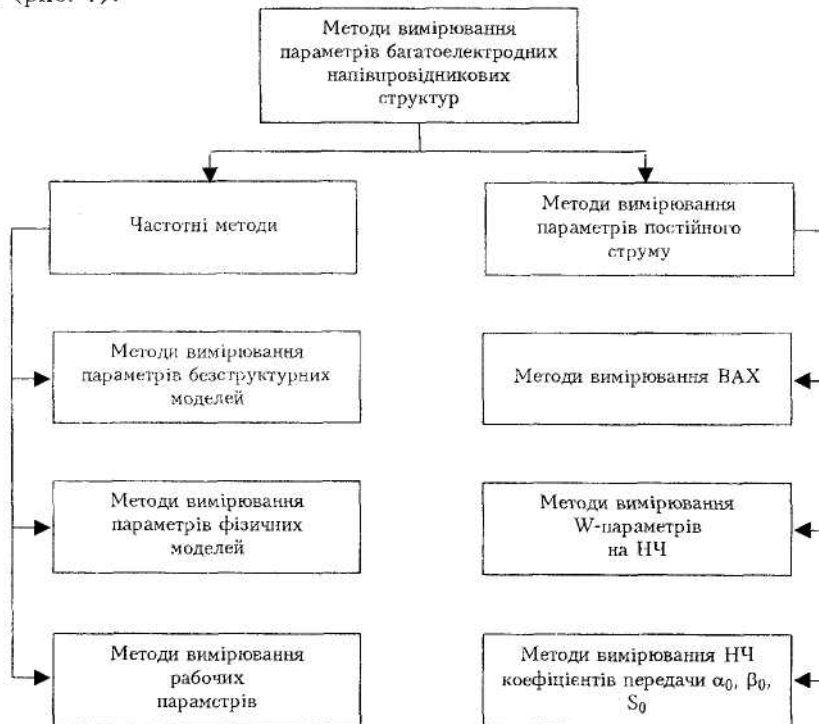


Рис. 1. Узагальнена класифікація методів вимірювання параметрів багатоелектродних напівпровідникових структур

На постійному струмі найчастіше вимірюють вольт-амперні характеристики (ВАХ), низькочастотні значення імітансних W -параметрів (коли вони описуються дійсними числами), а також низькочастотні коефіцієнти передачі (α_0 , β_0 , S_0 і ін.). Методи й апаратура, використовувані для вимірювання цих параметрів, є "класичними" і широко описані в різних літературних джерелах [1–3] і стандартизовані.

Частотні методи вимірювань можна розділити на три групи. Це методи вимірювання параметрів безструктурних моделей, методи вимірювання параметрів фізичних моделей і методи вимірювання робочих параметрів.

Усі методи вимірювання параметрів безструктурних моделей багатоелектродних напівпровідникових структур можна розділити на стандартні методи вимірювання параметрів у

режимі короткого замикання (КЗ) і холостого ходу (ХХ), стандартні методи вимірювання параметрів при фіксованому навантаженні і нестандартні методи вимірювання параметрів (рис. 2).



Рис. 2. Класифікація методів вимірювання параметрів безструктурних моделей багатоелектродних напівпровідникових пристроїв

Поява на початку 60-х років біполярних транзисторів, здатних підсилувати і генерувати електромагнітні коливання на частотах у декілька ГГц, поставило перед розробниками задачу вимірювання параметрів їхніх безструктурних моделей. Спроби здійснити вимірювання на цих частотах Y -, Z -, H - чи G -параметрів виявилися безуспішними в зв'язку з труднощами, а часто і неможливістю реалізації режимів КЗ чи ХХ на клеммах напівпровідникового приладу.

З огляду на те, що в діапазоні НВЧ практика вимірювань оперує зі значеннями, що характеризують хвильовий процес (комплексні коефіцієнтами відбиття і пропускання), було запропоновано на цих частотах багатоелектродні напівпровідникові структури також описувати хвильовими параметрами. Найбільш широке застосування отримали хвильові параметри передачі (T -параметри) і хвильові параметри розсіювання (S -параметри) [4].

Перша причина значного росту похибок з ростом частоти при вимірюванні хвильових параметрів пов'язана з неможливістю забезпечити сталість хвильового опору у всіх перетинах вимірювального тракту. Наприклад, на частоті 1 ГГц при значенні неузгодженості з КСХН = 1,2 похибка вимірювання S -параметрів складає 20 % [5].

Друга причина росту похибок почала виявлятися в міру вдосконалення транзисторів і збільшення їх граничних частот. Справа полягає в тому, що "ідеальний" транзистор, що включається за схемою чотирьохполосника, є потенційно-нестійким у широкому діапазоні частот. Але ця потенційна нестійкість залежить від значення і характеру імітансів, що підключаються до його вхідних і вихідних клем. З огляду на властивості трансформуючих довгих ліній вимірювального тракту навіть невелика неузгодженість у якомусь перетині вимірювального тракту може призвести до самозбудження вимірювальної установки (що експериментатор може і не встановити, а прийняти результат вимірювань за дійсний).

Один з можливих шляхів вирішення перерахованих вище проблем запропонований Н.З. Шварцем [6]. Ним показано, що при проектуванні НВЧ підсилувачів немає необхідності використовувати всю систему S -параметрів, а досить мати наступні параметри: Γ_{11} , S_{12} , S_{21} , Γ_{22} [8], які він назвав системою нестандартних S -параметрів, вимірюваних із більш високою точністю, ніж стандартні S -параметри.

Наступним кроком до підвищення точності вимірювання параметрів безструктурних моделей багатополіусників є використання методу "плаваючого навантаження". Справа в тому, що в основі стандартних методів вимірювання параметрів безструктурних моделей лежить одна загальна умова – сталість імітансів, що підключаються на вході чи виході чотириполіусника ($W_G = \text{const}$, $W_H = \text{const}$), що практично виконати неможливо. Так при вимірі у-параметрів повинна дотримуватися умова: $Z_G = 0$ чи $Z_H = 0$. При вимірюванні Z-параметрів: $Z_G = \infty$ чи $Z_H = Z_0$. При вимірюванні S-параметрів: $Z_G = Z_0$, $Z_H = Z_0$, де Z_0 – хвильовий опір вимірювального тракту.

У роботі [9] запропоновано непрямий метод вимірювання нестандартної системи W-параметрів чотириполіусника W_{11} , W_{22} , $\text{Re}(W_{12}W_{21})$, $\text{Im}(W_{12}W_{21})$, $|W_{12}W_{21}|$ у НВЧ діапазоні за результатами вимірювання його вхідного $W_{вх}$ і вихідного $W_{вих}$ імітансів при довільному і неконтрольованому імітансі навантаження W_H і генератора W_G . В основі цього методу лежить властивість чотириполіусника, відповідно до якого його вхідний $W_{вх}$ і вихідний $W_{вих}$ імітанси залежать від реактивної складової імітанса відповідно навантаження $\text{Im}W_H$ і генератора $\text{Im}W_G$, і ці залежності на комплексній площині представляють окружності [8].

Параметри імітансних окружностей визначаються шляхом вимірювання вхідного $W_{вх}$ (вихідного $W_{вих}$) імітанса чотириполіусника при трьох довільних значеннях імітанса навантаження W_H (генератора W_G) в області, де $\text{Re}W_{вх} > 0$, $\text{Re}W_{вих} > 0$, що забезпечує стійкість вимірювальної установки.

Розширення нестандартної системи W-параметрів досягається за рахунок вимірювання максимально досяжного коефіцієнта стійкості передачі чотириполіусника $K_{ms} = |W_{21}/W_{12}|$, що визначається різницевим методом шляхом вимірювання значень потужності сигналу, що пройшов через чотириполіусник у прямому P_1 і зворотному P_2 напрямку за умови сталості потужності генератора ($P_G = \text{const}$) [9]. Це дозволяє додатково визначити:

$$|W_{12}| = \sqrt{K_{ms}|W_{12}W_{21}|};$$

$$|W_{21}| = \sqrt{\frac{|W_{12}W_{21}|}{K_{ms}}}.$$

Подальшим розвитком цих методів є метод нейтралізації. Для його здійснення дві клеми чотириполіусника з'єднуються разом (утвориться триполіусник) і між ними і загальною шиною включається комплексний опір Z [10].

Якщо комплексний опір Z у загальному проводі підібрано таким чином, щоб при $Z = Z_1$ виконувалася умова

$$y_{12} = Z_1 \Delta y, \tag{1}$$

вхідна провідність знову утвореного чотириполіусника стає рівною

$$Y_{вх} = Y_{11} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{22} + Y_H} = Y_{11}. \tag{2}$$

Якщо комплексний опір у загальному проводі підібрати таким чином, щоб при $Z = Z_2$ виконувалася рівність

$$y_{21} = Z_2 \Delta y, \tag{3}$$

тоді вихідна провідність знову утвореного чотириполіусника стає рівною

$$Y_{вих} = Y_{22} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{11} + Y_G} = Y_{22}. \tag{4}$$

Узявши відношення (2) до (4)

$$\frac{Y_{11}}{Y_{22}} = \frac{Y_{11} + Z_1 \Delta y}{Y_{22} + Z_2 \Delta y} \tag{5}$$

і знаючи з експерименту y_{11} , y_{22} , Z_1 , Z_2 , $Y_{вх}$ і $Y_{вих}$, знаходимо

$$\Delta y = \frac{Y_{вих}y_{11} - Y_{вх}y_{22}}{Z_2 Y_{вх} - Z_1 Y_{вих}},$$

підставляючи значення якого в (1) і (3), знаходимо провідності прямої y_{21} і зворотної y_{12} передачі чотириполіусника.

Виконання умов (1) і (3) забезпечує нейтралізацію зворотної і прямої передач чотириполіусника в процесі вимірювання, що гарантує стійкість вимірювальної установки

навіть у випадку повної нестійкості вимірюваного чотириполіюсника. При цьому послаблюються вимоги до стабільності імітансів навантаження і генератора, властиві стандартним методам, що гарантує підвищення точності вимірювань імітансних параметрів у діапазоні НВЧ.

Основними факторами нестандартних методів, що впливають на точність вимірів, є:

- похибки вимірювання вхідного (вихідного) імітанса чотириполіюсника;
- похибки вимірювання потужності сигналу, що пройшов через чотириполіюсник;
- точність завдання імпедансів Z_1 і Z_2 .

Існує різна апаратура для вимірювання вхідного (вихідного) імітанса чотириполіюсника (вимірювальні лінії, вимірювальні мости, панорамні вимірювачі тощо [11]). В усіх цих приладах вимірювання зводяться до вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі напруги (КСХН) і фази (коефіцієнта відбиття). Наприклад, коаксіальні вимірювачі імітанса до частоти 1 ГГц забезпечують вимірювання КСХН із похибкою $\pm 7\%$ і фази $\pm 7^\circ$ при КСХН < 2 . Хвильоводні вимірювачі імітанса забезпечують до частоти 5 ГГц похибку вимірювання КСХН $\pm 4\%$ і фазового кута $\pm 4^\circ$ при КСХН ≤ 2 . Спеціальні методи калібрування дозволяють зберегти вищевказану похибку і при більш високих значеннях КСХН, що характерно для потенційно-нестійких багатополіюсників.

Вимірювання імітансних W -параметрів, щоб виключити нелінійні ефекти, у більшості випадків здійснюється в режимі малого сигналу при значеннях потужності генератора порядку 10^{-6} – 10^{-3} Вт. Існує велика кількість вимірювачів потужності таких сигналів із похибкою, що не перевищує ± 10 – 12% [11].

Точність завдання імпеданса Z_1 і Z_2 , реалізованого у виді активного навантаження [12], визначається похибкою виміру їхнього імітанса на етапі калібрування.

Висновки

1. Для опису безструктурних моделей багатоелектродних напівпровідникових структур у даний час використовуються параметри, що виміряні в режимі КЗ і XX (Y -, Z -, H - і G -параметри), у режимі фіксованого навантаження (S - і T -параметри) і нестандартні параметри, виміряні при "плаваючому навантаженні".

2. Основні похибки вимірювання Y -, Z -, H -, G -, S - і T -параметрів у діапазоні НВЧ пов'язані з неможливістю забезпечити необхідні значення фіксованих навантажень і з потенційною нестійкістю багатоелектродних напівпровідникових структур, що призводить до неконтрольованого самозбудження вимірювальної установки.

3. Метод "плаваючого навантаження" дозволяє частково позбутися від перерахованих у п.2 похибок вимірювання імітансних W -параметрів.

4. Основна похибка вимірювання імітансних W -параметрів визначається похибкою вимірювання вхідного (вихідного) імітанса чотириполіюсника. Зменшення цієї похибки може бути досягнуто переходом від вимірювання імітансів до вимірювання коефіцієнтів відбиття від входу і виходу чотириполіюсника.

5. З огляду на те, що в діапазоні НВЧ розрахунок більшості електронних пристроїв здійснюється з використанням хвильових S - і T -параметрів, доцільне використання методу "плаваючого навантаження" при вимірюванні цих параметрів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Аронов В.Л., Федотов Я.А. Испытания и исследования полупроводниковых приборов. - М.: Высшая школа, 1975. - 325 с.
2. Кузнецов В.А., Долгов В.А., Коневских В.М. и др. / Под ред. Кузнецова В.А. Измерения в электронике: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 512 с.
3. Столярский С. Измерение параметров транзисторов. - М.: Сов. радио, 1976. - 288 с.
4. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. - М.: Связь, 1971. - 388 с.
5. Мальтер Т.З. Параметры рассеяния высокочастотных транзисторов и методы их измерения // Средства связи. - 1978. - № 3. - С. 29–34.
6. Шварц Н.З. Система нестандартных S -параметров. - В кн. Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. Вып. 1 / Под ред. А.А. Васенкова и Я.А. Федотова. - М.: Сов. радио, 1976. - С. 302–310.

7. *Филинук Н.А.* Устройство для измерения полных сопротивлений многополюсников. А.с. СССР № 1141346А, заявл. 25.05.1982, опубл. 23.02.1985. БИ № 7.
8. *Богачев В.М., Никифоров В.В.* Транзисторные усилители мощности. – М.: Энергия, 1978. – 344 с.
9. *Филинук Н.А.* Определение параметров математических моделей информационных устройств на основе негатронов. – В кн. Негатроника / Под. ред. Л.Н. Степановой. – Новосибирск: Наука, 1995. – 315 с.
10. *Филинук Н.А.* Устройство для измерения параметров матрицы Y-проводимости четырехполюсника. А.с. СССР № 1095102А, заявл. 19.08.1982, опубл. 30.05.1984. БИ № 20.
11. *Чернушенко А.М., Майбородин А.В.* Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона волн. – М.: Радио и связь, 1986. – 336 с.
12. *Филинук М.А., Возняк О.М., Курзанов Я.І., Огороднік О.В.* Імпедансний пристрій. Патент України на винахід № 180059А, заявл. 22.03.1994, опубл. 31.10.93. Бюл. № 5.

ГАВРІЛОВ Дмитро Володимирович – аспірант Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- електроніка;
- комп'ютерне та телекомунікаційне приладобудування;
- програмування.

Тел.: (0432) 26-21-86.

ФІЛИНЮК Микола Антонович – доктор технічних наук, професор Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- радіоелектроніка;
- електроніка;
- комп'ютерне медико-біологічне та телекомунікаційне приладобудування.

Службовий тел.: (0432) 440075.

E-mail: filinyuk@vstu.vinnica.ua

Подано 17.08.2002