

УДК 621. 382

Л.Б. ЛІЩИНСЬКА

## МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ ОДНОКРИСТАЛЬНИХ УЗАГАЛЬНЕНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІМІТАНСУ

*Вінницький торговельно–економічний інститут КНТЕУ*

*вул. Соборна, 87, м. Вінниця, Україна*

*E-mail: L\_FiLi@mail.ru*

**Анотація.** Розроблено методи оптимізації багатоелектродної напівпровідникової структури, використовуваної як перетворювач імпедансу; сформульована цільова функція оптимізації, розроблено критерії оптимізації та проведена порівняльна оцінка їх переваг і недоліків.

**Аннотация.** Разработаны методы оптимизации многоэлектродной полупроводниковой структуры, используемой как преобразователь иммитанса; сформулирована целевая функция оптимизации, разработаны критерии оптимизации и проведена сравнительная оценка их преимуществ и недостатков.

**Abstract.** The methods of optimization of multielectrode semiconductor structure, in-use as a transformer of immittance is developed; the objective function of optimization is formulated, the criteria of optimization are developed and the comparative estimation of their advantages and failings is conducted.

**Ключові слова:** імпеданс, узагальнений перетворювач імпедансу, оптимізація, напівпровідникова структура.

### ВСТУП

Багатоелектродні напівпровідникові структури знаходять застосування не лише як підсилювальні компоненти, але і як однокристалні перетворювачі імпедансу (ПІ) [1]. З цією метою використовуються транзистори, що серійно випускаються, цільова функція яких на етапі їх проектування визначається завданням отримання більшого підсилення на вищих частотах при мінімальному коефіцієнті шуму. При використанні таких структур як однокристалні перетворювачі імпедансу ці критерії не є визначальними, а цільова функція повинна забезпечувати реалізацію перетворювача імпедансу, що прагне до «ідеального». Система робочих параметрів ПІ, що розглядається в [2], не надає ні якісного, ні кількісного вирішення цієї задачі.

### ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ І ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою досліджень є розробка методів оптимізації багатоелектродної напівпровідникової структури, використовуваної як перетворювач імпедансу. Для досягнення цієї мети поставлено завдання формулювання цільової функції оптимізації, розробки критеріїв оптимізації і порівняльної оцінки їх переваг і недоліків.

### ФОРМУЛЮВАННЯ СТРУКТУРНИХ КРИТЕРІЇВ ОПТИМІЗАЦІЇ

«Ідеальним» перетворювачем імпедансу вважається такий перетворювач, у якого коефіцієнт перетворення  $T$  не залежить від перетворюваного імпедансу  $W_n$  [3]. У загальному випадку для лінійного чотириполосника, яким можна охарактеризувати більшість ПІ, перетворюваний імпеданс  $W_{ex}$  при прямому перетворенні імпедансу навантаження  $W_n$  рівний [2]

$$W_{\hat{a}\hat{o}} = W_{11} - W_{12}W_{21}/(W_{22} + W_i) = (\Delta + W_{11}W_i)/(W_{22} + W_i), \quad (1)$$

де:  $\Delta = W_{11}W_{22} - W_{12}W_{21}$ ;  $W_{11}$ ,  $W_{22}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{21}$  – параметри імпедансної матриці чотириполосника.

Враховуючи, що все ПІ можна розділити на конвертори (КІ) та інвертори (І І) імпедансу, з (1) знаходимо коефіцієнт конверсії КІ  $T_K = W_{\hat{a}\hat{o}}/W_i$  та коефіцієнт інверсії І І  $T_I = W_{\hat{a}\hat{o}}W_i$ .

Виходячи з визначення «ідеального» ПІ, у якості узагальненого критерію оптимізації пропонується використовувати функцію відносної чутливості у вигляді

$$S_{Wi}^{\dot{O}} = \frac{\partial \dot{O}}{\partial Wi} \frac{Wi}{\dot{O}} = \operatorname{Re} S_{Wi}^{\dot{O}} + j \operatorname{Im} S_{Wi}^{\dot{O}} = |S_{Wi}^{\dot{O}}| e^{j\varphi_S}, \quad (2)$$

де  $|S_{Wi}^{\dot{O}}| = \sqrt{\operatorname{Re}^2 S_{Wi}^{\dot{O}} + \operatorname{Im}^2 S_{Wi}^{\dot{O}}}$ ;  $\varphi_S = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (\operatorname{Im} S_{Wi}^{\dot{O}} / \operatorname{Re} S_{Wi}^{\dot{O}})$ .

Для «ідеального» ПІ  $S_{Wi}^{\dot{O}} = 0$ . Звідки знаходимо окремі критерії оптимізації:

$$\operatorname{Re} S_{Wi}^{\dot{O}} = |S_{Wi}^{\dot{O}}| \cos \varphi_S \rightarrow 0; \operatorname{Im} S_{Wi}^{\dot{O}} = |S_{Wi}^{\dot{O}}| \sin \varphi_S \rightarrow 0. \quad (3)$$

Цільові функції (2 і 3) можна розглядати як критерії оптимізації на структурному рівні (табл.1). Чим менше їх значення, тим ближче ПІ, що розглядається до «ідеального». У дійсного ПІ, що характерно для низькочастотних ПІ, у якості критерію оптимізації потрібно використовувати умову  $\operatorname{Re} S_{Wi}^{\dot{O}} \rightarrow 0$ .

Для високочастотних уявних ПІ більш підходить функція  $\operatorname{Im} S_{Wi}^T \rightarrow 0$ .

Таблиця 1

**Умови оптимізації напівпровідникової структури на різних рівнях**

Схема включення	Біполярний транзистор, включений за схемою зі спільним колектором
Структурний рівень	$S_{W_H}^T \rightarrow 0, \operatorname{Re} S_{W_i}^{\dot{O}} \rightarrow 0, \operatorname{Im} S_{W_i}^T \rightarrow 0$
Рівень еквівалентної схемотехніки	$r_a \ll Z_a, r_a \ll Z_{\Pi}, W_i \ll W_{22}, W_{\Gamma} \ll W_{11}$
Електрофізичний рівень	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Зменшення геометричних розмірів (<math>\epsilon, c</math>).</li> <li>2. Управління режимом дифузії домішок (<math>D, t</math>).</li> <li>3. Вибором електрофізичних параметрів напівпровідника <math>(\epsilon, \mu, N_{\dot{e}}, N_{\dot{A}AE})</math>.</li> </ol>

У загальному випадку всі величини, що входять в (2), є комплексними. У зв'язку з цим, при використанні критерію (2) необхідно перевірити виконання умови аналітичності функції  $T$ , яка повинна відповідати, по-перше, умові Коши-Рімана:

$$\frac{\partial \operatorname{Re} T}{\partial \operatorname{Re} W_i} = \frac{\partial \operatorname{Im} T}{\partial \operatorname{Im} W_i}; \frac{\partial \operatorname{Re} T}{\partial \operatorname{Im} W_i} = - \frac{\partial \operatorname{Im} T}{\partial \operatorname{Re} W_i},$$

а по-друге, повинна забезпечуватися безперервність окремих похідних функцій  $\operatorname{Re} T$  і  $\operatorname{Im} T$  [4].

**ОЦІНКА ОПТИМАЛЬНОСТІ ПІ НА РІВНІ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМОТЕХНІКИ**

Вище розглянуті критерії базуються на використанні  $W$ -параметрів ПІ, які є частотозалежними і не завжди можуть з необхідною точністю бути вимірними або розрахованими. Особливо це відноситься до діапазону ультрависоких і надвисоких частот. В результаті, незважаючи на високу достовірність цих критеріїв, при їх використанні може бути не досягнута необхідна точність. Крім того, використання їх на етапі оптимізації вимагає рішення багатфакторної задачі, коли необхідно здійснювати варіювання 4-ма комплексними  $W$ -параметрами, які у більшості випадків не корелюються між собою.

З метою спрощення рішення задачі оптимізації пропонується використовувати критеріальні оцінки, отримані з фізичних еквівалентних схем багатоелектродних напівпровідникових структур. У основі цих рішень лежить аналіз рівняння (1), з якого витікає [2], що при виконанні умов

$$W_{22} = \infty, \quad (4)$$

$$\Delta = 0 \quad (5)$$

чотириполусник матиме властивості «ідеального» КІ з коефіцієнтом прямої конверсії  $\dot{O}_{e,i} = W_{11}/W_{22}$ .

Для випадку зворотної конверсії імітансу додатково необхідно виконання умови  $W_{11} = \infty$ . Для реального випадку виконання цих умов нездійсненно, але з мінімальною погрішністю вони можуть бути замінені іншими умовами:  $W_i \ll W_{22}; W_{\dot{A}} \ll W_{11}$ , які практично легко виконуються при відомих

$W_{11}$  і  $W_{22}$  шляхом введення відповідних обмежень на величину перетворюваних імітансів  $W_i$  і  $W_{\tilde{A}}$ .

Порушення умови (5) призводить до залежності реального коефіцієнта конверсії  $\dot{O}_{\tilde{e}\delta}$  від величини перетворюваного імітансу  $W_i$ :  $\dot{O}_{\tilde{e}\delta} = \dot{O}_{\tilde{e}i} + \Delta/W_{22}W_i$ . Доданок  $\Delta/W_{22}W_i$  характеризує міру «неідеальності» реального КІ.

Кількісно цю величину можна отримати використовуючи фізичну еквівалентну схему багатоелектродної напівпровідникової структури. Покажемо це на прикладі КІ, що реалізується на базі біполярного транзистора, включеного за схемою зі спільним колектором і описуваного матрицею провідності [1]

$$[\dot{O}\tilde{e}] = \begin{bmatrix} \dot{O}_{11\tilde{E}} & \dot{O}_{12\tilde{E}} \\ \dot{O}_{21\tilde{E}} & \dot{O}_{22\tilde{E}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{\tilde{I}} + r_{\tilde{a}}}{Z_{\tilde{I}} r_{\tilde{a}}} & -\frac{1}{r_{\tilde{a}}} \\ -\frac{1}{r_{\tilde{a}}(1-h_{21})} & \frac{Z_{\tilde{a}} + r_{\tilde{a}}}{Z_{\tilde{a}} r_{\tilde{a}}(1-h_{21})} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

яка є справедливою, коли комплексний опір емітерного переходу  $Z_E$  врахований при виборі значення перетворюваного імітансу.

У матриці (6):  $Z_{\tilde{a}} = 1/j\omega C_{\tilde{E}1}$ ;  $Z_{\tilde{I}} = 1/j\omega C_{\tilde{E}2}$ ,  $\tilde{N}_{\tilde{E}1}$  і  $\tilde{N}_{\tilde{E}2}$  – активна і пасивна ємкості колекторного переходу;  $r_{\tilde{a}}$  – омичний опір бази;  $h_{21}$  – комплексний коефіцієнт передачі транзистора по струму. З (6) знаходимо:

$$\Delta = \frac{(Z_{\Pi} + r_{\tilde{a}})(Z_{\tilde{a}} + r_{\tilde{a}}) - Z_{\Pi}Z_{\tilde{a}}}{Z_{\Pi}Z_{\tilde{a}}r_{\tilde{a}}^2(1-h_{21})}.$$

Якщо забезпечити виконання умов:

$$r_{\tilde{a}} \ll Z_{\Pi} \text{ і } r_{\tilde{a}} \ll Z_{\tilde{a}}, \quad (7)$$

тоді  $\Delta \approx 0$  і  $\dot{O}_{\tilde{e}\delta} \approx \dot{O}_{\tilde{e}i}$ . Один з шляхів рішення цієї задачі – підбір транзистора з відповідними параметрами еквівалентної схеми або підбором режиму живлення транзистора. Наприклад, збільшення струму емітера  $I_E$  і напруги на колекторі  $U_{\tilde{E}}$  призводить до зменшення  $r_{\tilde{a}}$  і  $\tilde{N}_{\tilde{E}}$ .

Аналогічно вирішується завдання оптимізації на рівні еквівалентної схемотехніки і для інших багатоелектродних напівпровідникових структур при різних схемах їх включення.

### ОЦІНКА ОПТИМАЛЬНОСТІ ПІ НА ФІЗИЧНОМУ РІВНІ

Як вже раніше наголошувалося, при розробці багатоелектродних напівпровідникових структур, до яких відносяться всі види транзисторів, цільовою функцією є отримання максимального коефіцієнта посилення на вищих частотах при мінімальному коефіцієнті шуму. Для ПІ ці параметри не настільки критичні і тому можлива постановка задачі створення нових багатоелектродних напівпровідникових структур, що забезпечують реалізацію ПІ за параметрами, близькими до «ідеального». При цьому критерії оптимальності можна отримати на підставі критеріїв оптимальності, на рівні еквівалентної схемотехніки (табл.1) шляхом опису параметрів, що входять до них, через фізичні параметри напівпровідникової структури. Продемонструємо цю методику на прикладі вище розглянутого КІ на основі біполярного транзистора, включеного за схемою зі спільним колектором.

Як впливає з (7), досягнення умов оптимальності залежить від величини двох параметрів: омичного опору бази  $r_{\tilde{a}}$  і бар'єрної ємкості колекторного переходу  $\tilde{N}_{\tilde{e}} = \tilde{N}_{\tilde{e}\tilde{a}} + \tilde{N}_{\tilde{e}i}$ , які залежать від електрофізичних параметрів напівпровідникової структури. Використовуючи класичну структуру планарного дрейфового транзистора знаходимо [5]

$$\tilde{N}_K = \tilde{N}_A \left[ \frac{q(\varepsilon\varepsilon_0)^2 N_K \dot{a}}{12(\varphi_{\dot{e}} - U_K)} \right]^{1/3}, \quad \ddot{a} \dot{e} \dot{y} U_{\dot{e}} \gg \varphi_{\dot{e}}; \quad r_{\dot{a}} = \frac{1,1\dot{a}}{q\mu N_{AAE}}, \quad (8)$$

де  $\dot{a} = 1/2\sqrt{Dt}$  – фактор поля;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $t$  – час проведення дифузії домішки;  $\varepsilon$  і  $\varepsilon_0$  – відносна і абсолютна діелектрична проникність напівпровідника;  $\mu$  – рухливість заряду;  $N_K$  і  $N_{ДБЕ}$  – концентрація домішок у колекторі і у базі під емітером;  $B, C$  – геометричні розміри топології транзистора [5].

Аналіз (8) показує, що управляти величиною  $\tilde{N}_{\dot{E}}$  і  $r_{\dot{a}}$  можливо трьома шляхами:

- зміною геометричних розмірів ( $B, C$ ) напівпровідникової структури;
- управляючи режимом дифузії домішок ( $D, t$ );
- підбором електрофізичних параметрів напівпровідника ( $\varepsilon, \mu, N_K, N_{ДБЕ}$ ).

Зменшення геометричних розмірів  $B$  і  $C$  призведе до зниження  $\tilde{N}_{\dot{E}}$  і потенційно обмежено можливостями фотолітографії. Найбільш ефективним виявляється зменшення фактора поля  $\dot{a}$ , яке проводить до зниження як  $r_{\dot{a}}$  так і  $\tilde{N}_{\dot{E}}$ , але це також призводить до погіршення частотних властивостей транзистора. Тому найбільш переважним є третій шлях підбору електрофізичних параметрів напівпровідника ( $\varepsilon, \mu$ ) і концентрації домішок ( $N_K, N_{ДБЕ}$ ), що вводяться. Наприклад, вибираючи напівпровідник з меншою діелектричною проникністю  $\varepsilon$ , що призводить до зменшення  $\tilde{N}_{\dot{E}}$ , і великими значеннями рухливості  $\mu$  і коефіцієнта дифузії  $D$ , що призводить до зменшення  $r_{\dot{a}}$ . З цієї точки зору слід рекомендувати реалізацію транзисторних структур на базі напівпровідників АІІ BV – групи.

При використанні розглянутої методики необхідно враховувати і зміну інших параметрів приладу. Перш за все, коефіцієнта передачі (посилення)  $\alpha(\beta)$  і граничної частоти  $f_T$  та шукати компромісні рішення.

## ВИСНОВКИ

1. Узагальненою цільовою функцією оптимізації перетворювача імітансу є наближення його параметрів до «ідеального» ПІ, під яким слід розуміти ПІ, коефіцієнт перетворення імітансу якого не залежить від перетворюваного імітансу.

2. Кількісно, ступінь оптимізації рекомендується оцінювати критеріями оптимальності, які можна розділити на критерії структурного рівня, рівня еквівалентної схемотехніки та електрофізичного рівня.

3. У теоретичному плані найбільш точним є структурний рівень, але він вимагає рішення багатофакторної задачі при слабкому корелюванні параметрів. Електрофізичний рівень передбачає створення нової багатоелектродної напівпровідникової структури, що відповідає вимогам ПІ. З практичної точки зору найбільший інтерес представляє рівень еквівалентної схемотехніки, що має відносну простоту і може бути застосований до будь-якої напівпровідникової структури за умови наявності її фізичної еквівалентної схеми.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Філінюк М.А. Основи негatronіки. Том 1. Теоретичні і фізичні основи негatronіки: [Монографія] / М.А. Філінюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 456 с. – ISBN 966-641-198-9.
2. Філінюк М. А. Аналіз і синтез інформаційних пристроїв на базі потенційно–нестійких узагальнених перетворювачів імітансу: [Монографія] / М. А.Філінюк. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 85 с.
3. Бенінг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах / Ф. Бенінг. – М.: Сов. радио, 1975. – 288с.
4. Анго Андре. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго. – М.: Наука, 1967. – 780с.
5. Трутко А.Ф. Методы расчета транзисторов / А.Ф. Трутко – М.:Энергия, 1971. – 272с.

Надійшла до редакції 12.10.2010р.

**ЛІЩИНСЬКА ЛЮДМИЛА БРОНІСЛАВІВНА** – к.т.н., доцент, **Вінницький торговельно–економічний інститут Київського національного торговельно–економічного університету, м. Вінниця, Україна**