

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ НАДІЙНОСТІ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВЕЛИКИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ЗА ЕФЕКТАМИ НЕЛІНІЙНОСТІ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

С.Новосядлий, О.Фрик

*Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, тел. (0342) 71 48 48,
e-mail: kre@pu.if.ua*

Сучасний стан розвитку світової електронної промисловості характеризується неперервним підвищенням вимог до надійності виробів твердотільної електроніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки. Пошук оптимальних шляхів забезпечення цих вимог вказав на необхідність глибокого розуміння фізики явищ, які призводять до відказів ВІС, та відмов надійності. Фізичний підхід до забезпечення надійності напівпровідникових приладів сформувався ще в 70-80-ті роки. На сьогоднішньому етапі це необхідно зробити і для субмікронних структур ВІС, на що вказують матеріали даної статті.

Ключові слова: субмікронні структури ВІС, тестові структури, електрофізичне діагностування, конструкторсько-технологічні обмеження проектних норм.

Електрофізичні методи діагностування субмікронних структур великих інтегральних схем (ВІС) за інтегральними ефектами нелінійності, які відповідають функціональним характеристикам виробів, дають змогу не тільки оцінити технічний стан об'єктів діагностування, але і прогнозувати надійність ще на етапі формування їх структур. Дані методи з успіхом можуть бути використані при атестаційному, приймальному контролі на виробництві та на входному контролі у фазі застосування в схемотехніці [1, 3].

Вказаний метод оснований на тому, що стан структури кристалу ВІС відображається на особливостях характеристик, що реєструються на зовнішніх виводах ВІС, а саме: вольт-амперних (ВАХ), вольт-кулонних чи вольт-фарадних (ВКХ або ВФХ), ампервеберних (АВБХ), що описують властивості електропровідності, поляризованості та намагнічуваності фізичного середовища. Відповідно, функціональні характеристики, які відображують особливості руху носіїв заряду та зв'язаних зарядів у фізичному середовищі структури ВІС за різних рівнів їх енергетичної активації та різних режимів включення характеризуються індивідуальними параметрами нелінійності.

Для конкретної структури ВІС відповідає деяка область в тривимірному функціональному просторі, де кожна координата простору являє собою відповідний функціонал від ВАХ: $\Phi_1[I(U)]$, ВКХ: $\Phi_2[Q(U)]$, АВБХ: $\Phi_3[\Psi(I)]$. Виникнення відповідних дефектів у фізичному середо-

вищі структури ВІС пов'язано із зміною положення координат стану об'єкта діагностування в цьому просторі, аж до виходу за межі області допустимого стану. Різним за характером дефектам відповідають визначені області простору структури ВІС.

Для реалізації процесу електрофізичного діагностування структури ВІС необхідно вирішити чотири основні завдання [1, 2, 3]:

1) для структур ВІС конкретного типу вибрати такі функціонали $\Phi_1[I(U)]$, $\Phi_2[Q(U)]$, $\Phi_3[\Psi(I)]$ у просторі яких забезпечується максимальна роздільність фізичного стану об'єкта діагностування в залежності від їх дефектності за фізико-технологічним станом. Саме на цьому етапі закладаються основи достовірності діагностування;

2) визначити первинну діагностичну інформацію про об'єкт діагностування, на основі якого можуть бути визначені координати стану цього об'єкта у вибраному функціональному просторі;

3) визначити поточні координати стану об'єкта діагностування в просторі функціональних характеристик та прийняти рішення про стан діагностування структур ВІС уже з використанням діагностичних моделей;

4) сконструювати тестові структури, за допомогою яких на основі встановлених функціоналів моделювались би об'єкти діагностування та вибрати їх метрологію і програмування на ПК.

Класифікація методів діагностування структур ВІС за інтегральними ефектами нелінійності в залежності від способу отримання первинної діагностичної інформації наведена на рис. 1.

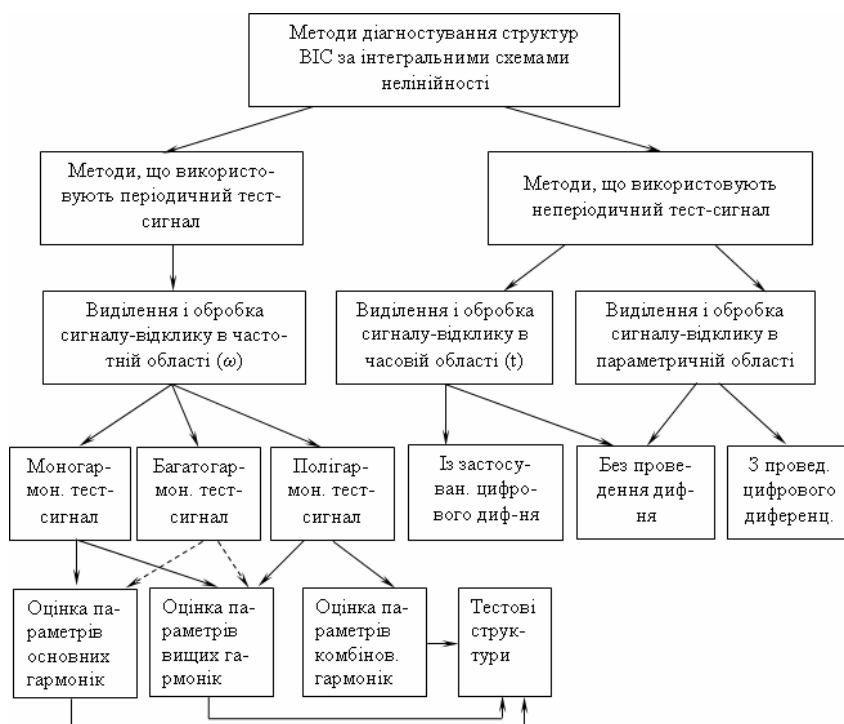


Рис. 1. Класифікація методів електрофізичного діагностування структур ВІС за інтегральними ефектами нелінійності.

Згідно з рис. 1 до цих методів слід віднести: вольт-амперометрію (МВАМ); аналогово і цифрового диференціювання ВАХ; динамічних та імпульсно-модульованих динамічних ВАХ; динамічних і статичних вольт-фарадних характеристик (ВФХ); дифенціональної провідності (МДПр); вищих гармонік (МВР); другої і третьої гармонік (МДрГ) і (МТрГ); нульових биттів (МНБ); різницевої частоти (МРЧ).

Кожний із досліджуваних методів фіксує з різним ступенем достовірності будь-яку частину інформації про параметри нелінійності функціональних характеристик структур ВІС. При цьому дані вимірювань тестових структур представляються [6]:

- відповідними похідними основних функціональних характеристик за різних значень аргументу допустимої області;

- множиною точкових значень функціональних характеристик, які є відмінними від еталонних (прямої чи кривої);

- через параметри основних та вищих гармонік у зв'язку з параметрами нелінійності відповідної функціональної характеристики.

Нам відомо з математики, що інформативність електрофізичних характеристик $\Phi(x)$ може бути значно збільшена, якщо досліджувати першу, другу, n - похідну функції $\Phi(x)$: $\Phi'(x)$, $\Phi''(x)$... $\Phi^n(x)$. Наприклад, якщо в p - n - переході переважають генераційно-рекомбінаційні процеси, то їх кількісну характеристику визначає m – фактор, який змінює нелінійність прямої вітки ВАХ p - n - переходу. Збільшення зарядового стану межі Si – SiO₂ призводить до зсуву вольт-фарадної характеристики та її нелінійності. Саме такі динамічні зміни нелінійності ефективно визначаються за похідними.

Такі похідні є, повною мірою самостійними характеристиками, які мають свої особливості та діагностичні ознаки. Проте, не всі похідні однаковою мірою інформативні, а найбільша діагностична інформативність може бути притаманна лише деяким з них.

Вибір із загального числа похідних найбільш інформативних і визначення допустимих меж диференціювання вихідної характеристики $\Phi(x)$ є одним із важливих методів електрофізичного діагностування за нелінійностями характеристики $\Phi(x)$.

Відомо, що метод похідних (диференціальний метод), як свідчить досвід, є найбільш результативним у разі застосування до окремих ділянок електрофізичних характеристик, які виражають різну зміну механізму функціонування структур ВІС чи їх тестових структур. Такі області характеристик мають локальний характер порівнянно з цілою характеристикою. Прикладом цього можуть бути області переключення електронного ключа, переходу струму в насичення, розвиток лавинного чи тунельного пробою, зміна стану межі розділу Si - SiO₂ – від збагачення до збіднення та інверсії. Похідні характеристики тут розкривають структуру перехідної області, яку можна визначити як деякий розподіл фізичної (електричної) величини, наприклад: розподіл густини струму за напругою переключення ключа, розподіл площі емітера за значенням

густини струму насичення, розподіл площі p - n - переходу за значенням напруги пробною.

Незалежно від фізичної природи, вказані розподіли мають узагальнений математичний опис у вигляді функції розподілу $h(x)$, як це зображено на рис. 2. Виходячи із основ радіофізики, випадкові процеси, як статистичні, можуть мати розмитий дифузний характер (рис. 2а), або дискретний характер з окремо вираженими піками (рис. 2б).

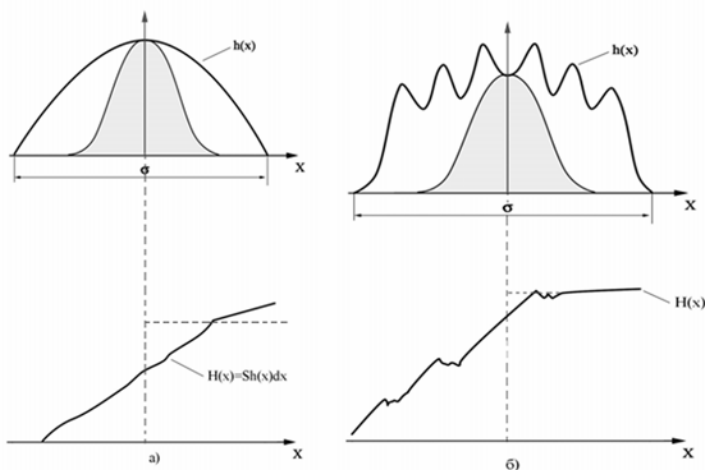


Рис. 2. Функція розподілу $h(x)$, яка має дифузний а) та дискретний б) характер.

Заштриховані області – це теоретичні моделі розподілу фізичної величини (ідеальні). Порівнюючи реальну модель з ідеальною, можна судити вже про неідеальність фізичної величини.

Особливістю функції розподілу $h(x)$ є те, що інтеграл від цієї функції $h(x)$ дає функцію включення (стрибка) $H(x)$. Чим вужчий розподіл $h(x)$, тим функція $H(x)$ стає ближчою до одиничної функції Хевісайда, яка відповідає ідеальному включенню (стрибка).

Складність пошуку інформативної похідної пов'язана з тим, що наперед невідомо, яка похідна може дати шуканий розподіл. На рис. 3 подано функцію $\Phi(x)$ у двох варіантах, близьких до функції електрофізичного діагностування: лінійною а) та нелінійною б). Як бачимо із графіків, вибір інформативної похідної для практичного аналізу далеко неоднозначний і залежить від вихідної функції $\Phi(x)$. Цю задачу, для прикладу, (рис. 3) ми розв'язали аналітично, тобто для випадку а) – це функція $\Phi''(x)$, а для випадку б) – це функція $\Phi'''(x)$. Як це розв'язати функціонально за допомогою ПК, використовуючи спеціальні програми в Matlab чи іншій програмі моделювання.

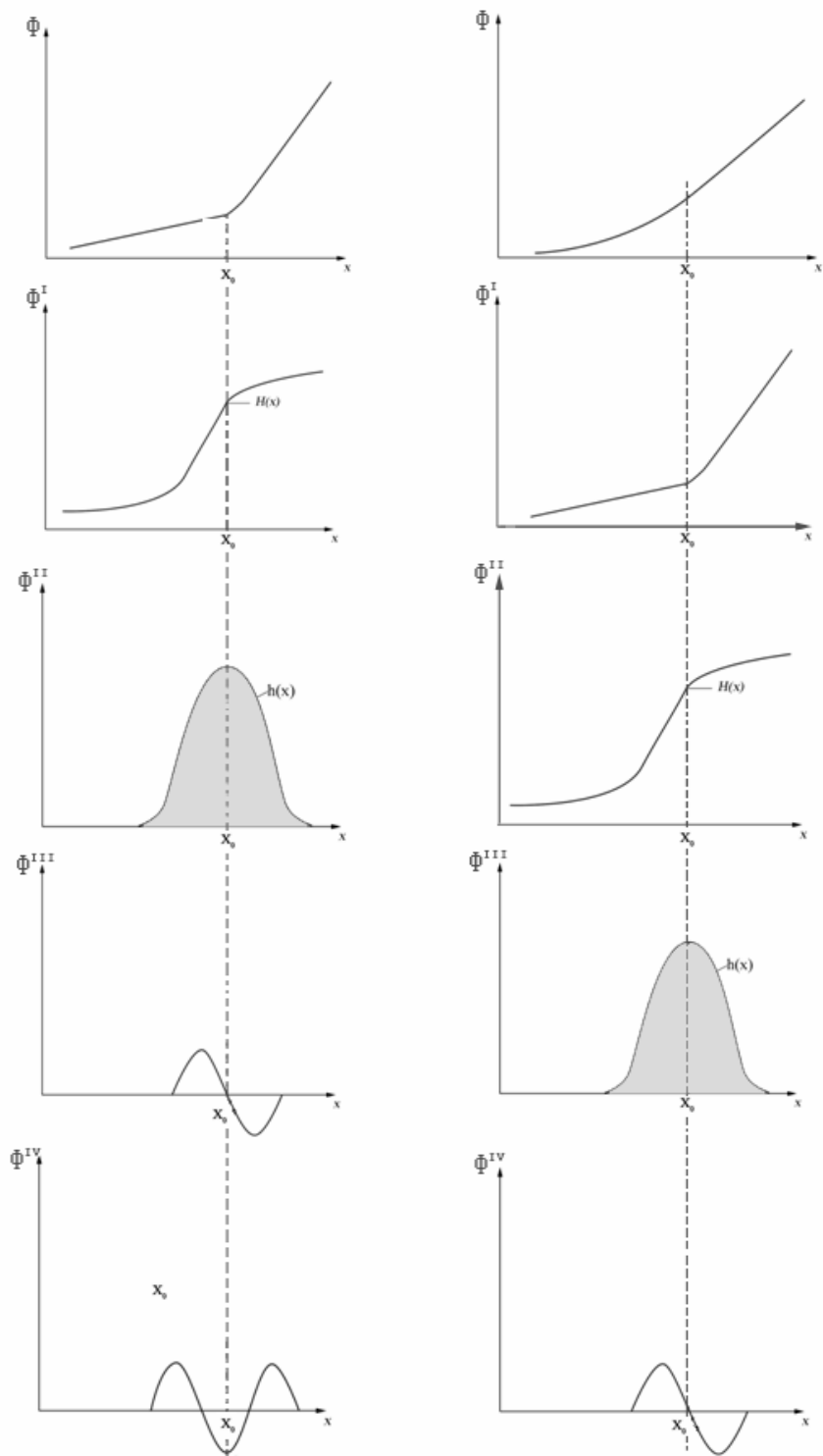


Рис. 3. Пошук інформативної похідної: при вихідній лінійній характеристиці $\Phi(x)$, коли $\Phi''(x)$ є функцією розподілу $h(x)$; при вихідній квадратичній характеристиці, коли $\Phi''(x)$ є функцією розподілу $h(x)$.

Цю задачу будемо розв'язувати від зворотнього. Нехай функція $\hat{O}^n(x)$ є та вища похідна, яка дає розподіл $h(x)$ в околі точки x_0 , тобто $\hat{O}^n(x) = \varepsilon h(x - x_0)$, де ε – нормована амплітуда розподілу $h(x - x_0)$. Послідовно інтегруючи цю функцію n – разів, і враховуючи, що $H(x - x_0) = \int h(x - x_0) dx$, приходимо до первинної функції $\Phi(x)$, О“~~111~~

Тут вже $\Phi(x)$ – множина функцій, які близькі до функції включення Хевісайда – функції стрибка константи a_0 (рис. 4а). Параметрами цієї множини є a_0 і ε .

При $n = 2$ із формули (1) отримаємо множину функцій $\Phi(x)$, для яких розподіл $h(x-x_0)$ спостерігаємо в другій похідній (рис. 4б). Функція $\Phi(x)$ має вигляд ламаної в своїй головній частині.

При $n = 3$ із формули (1) отримаємо вже множину функцій $\Phi(x)$, для яких розподіл $h(x-x_0)$ вже спостерігаємо в третій похідній, тоді функція $\Phi(x)$ представляє функцію-характеристику із ламаною квадратичною складовою (рис. 4в).

Аналогічно, при $n = 4$ отримаємо множину функцій-характеристик, для яких розподіл проявляється вже в четвертій похідній і тут $\Phi(x)$ – це вже степенева функція з ламаною кубічною складовою.

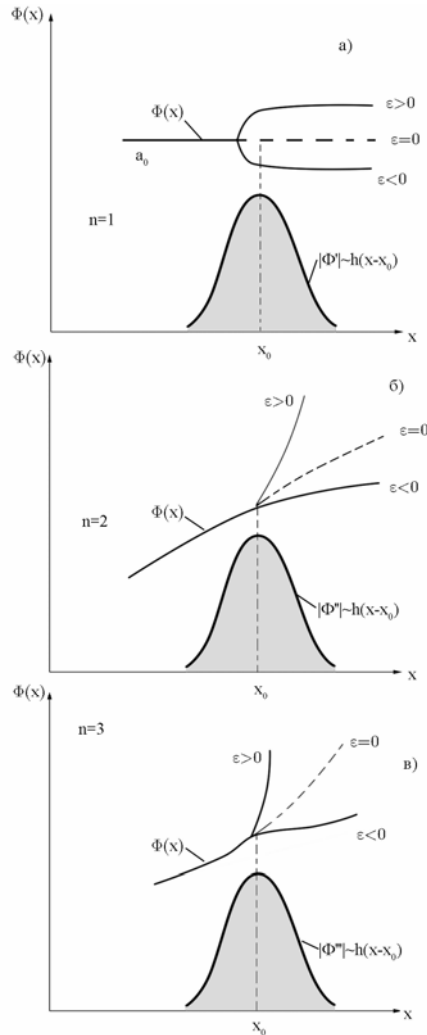


Рис. 4. Множини функцій $\Phi(x)$, для яких розподіл $h(x-x_0)$ спостерігається в першій (а), другій (б) і третій (в) похідних.

При $n = 5$ отримаємо множину функцій-характеристик $\Phi(x)$, для яких розподіл $h(x-x_0)$ проявляється вже в четвертій похідній. Тут $\Phi(x)$ – степенева функція із зломом в біквadratних складових.

Зі збільшенням n множина функцій $\Phi(x)$ може бути значно розширена шляхом додавання до $\Phi(x)$ регулярного полінома $f(x)$ з нескінченим числом членів – рядом Тейлора. При цьому розподіл $h(x-x_0)$ буде визначатись n -похідною і спостерігатиметься на фоні монотонної зміни похідної $f^n(x)$.

Таким чином, приєднання до функції $\Phi(x)$ регулярного полінома з постійними коефіцієнтами не порушує принципу виділення розподілу $h(x-x_0)$. Тоді формулу (1) в кінцевому вигляді можна подати так:

$$\Phi(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + \frac{1}{2}a_2(x-x_0)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!}[a_{n-1} + \varepsilon H(x-x_0)](x-x_0)^{n-1} + \frac{1}{n!}a_n(x-x_0)^n + \dots + R_0 h(x-x_0). \quad (5)$$

Із цієї формули можна виділити дві різні нелінійності. Одна – регулярна, властива степеневому ряду з постійними коефіцієнтами, що проявляється у всій області задання $\Phi(x)$. Друга – локальна, яка представлена у вигляді стрибка $H(x-x_1)$ і проявляється в околі точки x_0 .

Комп’ютерний аналіз таких функцій дає змогу легко знаходити похідну, яка визначає розподіл. А використання тестових структур дає змогу з високою точністю моделювати практично всі фізичні ефекти в елементах структур ВІС [5, 7].

Висновки:

1. Електрофізичне діагностування параметрів структур ВІС можна проводити за нелінійностями їх характеристик.
2. На основі елементів структур ВІС визначають тестові структури, що дозволяють моделювати електрофізичні параметри, які визначають надійність.
3. Моделюючою функцією в цьому випадку може бути степеневий ряд Тейлора, коефіцієнти якого можна вводити показником надійності елементів.
4. На основі показників надійності елементів структур ВІС визначаються проектні норми конструкторсько-технологічних обмежень.
5. Найбільш інформативними фізичними параметрами є: m -фактор p - n -переходу; порогова напруга та її температурна стабільність, надпорогові та тунельні струми; напруга змінного нуля диференціального підсилювача; друга гармоніка конденсатора; тепловий опір елемента структури; рухливість носіїв заряду та час їх “життя”.

Література

1. Новосядлий С.П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем. – Івано-Франківськ: Сімик. – 2003. – 200 с.

2. Новосядлий С.П. Тестовий контроль електрофізичних параметрів структур в системній технології високого рівня // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №2. – С.58-64.

3. Новосядлий С.П. Електрофізичне діагностування надійності структур ВІС // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1999. – №367. – С.187-197.

4. Новосядлий С.П. Аналітичні фізико-хімічні методи аналізу і контролю в системній технології ВІС // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №3. – С.30-38.

5. Новосядлий С.П. Технологічна САПР на основі тестових структур. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т.3, №1. – С.179-189.

6. А. с. СССР № 1259817. Способ контроля интегральных схем / Р.А. Владимирский, В.В. Гаврилов, А.С. Очков, Д.В. Шабалов – Оpubл. в БК. – 1988. – № 14. – 3 с.

7. Новосядлий С.П., Запухляк Р.І., Мельник П.І. Прогнозування надійності структур великих інтегральних схем за допомогою імпульсних нерівноважних вольт-фарадних характеристик // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т.6, №1. – С.153-160.

ELECTROPHYSICAL DIAGNOSIS OF THE LARGE SCALE INTEGRATION SUBMICRON STRUCTURES RELIABILITY BASED ON THE EFFECTS OF THE NONLINEARITY OF THEIR CHARACTERISTICS

S.Novosyadliy, O.Fric

PreCarpathian National University by V. Stefanic

Ivano-Frankivs'k, Shevchenko Street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine, ph. (0342) 71 48 48, e-mail: kre@pu.if.ua

Nowadays the development of the world electronic industry is characterized by constant increase of the reliability requirements to the products of the solid-state electronics, microelectronics and optoelectronics. The search for the optimal ways of the fulfillment of these requirements showed the necessity of deep understanding of the physics of phenomena, which cause the breakdown of the LSI and increase of the importance of their reliability. The physical approach to the provision of the reliability of semi-conductors was formed in the 70-80-ies. Nowadays it should be also done for the submicron LSI structures. This is the problem we describe in our article.

Keywords: *submicron LSI-circuit structure, test structure, electrophysical diagnostics, engineering and design limitation of rule.*