

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. А. Філинюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська

**ІНФОРМАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ
ПОТЕНЦІЙНО-НЕСТІЙКИХ
БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ШОТТКІ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2009

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/483>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.396.6:621.774.011.3

ББК 32.843.3

Ф 57

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 9 від 23.04.2009р.)

Рецензенти:

В. М. Кичак, доктор технічних наук, професор

Ф. Д. Касимов, доктор технічних наук, професор

В. Н. Локазюк, доктор технічних наук, професор

Філинюк, М. А.

Ф 57 Інформаційні пристрої на основі потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шотткі : монографія / М. А. Філинюк, О. М. Куземко, Л. Б. Ліщинська. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 274 с.

ISBN 978-966-641-332-4

В монографії розглядаються питання дослідження потенційно-нестійких багатоелектродних напівпровідникових структур Шотткі та проектування інформаційних пристроїв на їх основі. Визначено іммітансні характеристики чотириполосників в режимі малого сигналу, досліджено вплив температури та напруги живлення і керування на параметри різних типів узагальнених перетворювачів імітансу.

Книга розрахована на студентів, аспірантів, наукових співробітників та спеціалістів, які займаються проектуванням і розробкою інформаційних систем, систем керування та пристроїв на базі негатронів.

УДК 621.396.6:621.774.011.3

ББК 32.843.3

ISBN 978-966-641-332-4

© М. Філинюк, О. Куземко, Л. Ліщинська, 2009

Світлій пам'яті
Касимова Фуада Джалаловича,
почесного професора
Вінницького національного
технічного університету
присвячується

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ.....	11
1.1. Визначення та класифікація інформаційних пристроїв.....	11
1.2. Критеріальна оцінка стану стійкості інформаційного пристрою.....	13
РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ШОТТКІ.....	22
2.1. Властивості та характеристики переходу метал–напівпровідник	22
2.1.1. Теорія термоелектронної емісії	22
2.1.2. Дифузійна теорія	24
2.1.3. Теорія термоелектронної емісії – дифузії.....	24
2.1.4. Теорія польової та термopольової емісії	26
2.2. Однозатворний транзистор Шотткі.....	29
2.2.1. Принцип роботи	29
2.2.2. Статичні характеристики	33
2.2.3. Еквівалентні схеми.....	36
2.3. Багатозатворний польовий транзистор Шотткі	45
РОЗДІЛ 3. ЧОТИРИПОЛЮСНИКИ НА ОСНОВІ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ ШОТТКІ	49
3.1. Чотириполосники на основі однозатворного польового транзистора Шотткі.....	49
3.1.1. Параметри невизначеної матриці провідності ПТШ1.....	49
3.2. Чотириполосники на основі двозатворного польового транзистора Шотткі.....	51
3.2.1. Математична модель чотириполосника на базі ПТШ2 при включенні його за схемою (31, 32).....	55
3.2.2. Математична модель чотириполосника на базі ПТШ2 при включенні його за схемою (31, В)	57
3.2.3. Математична модель чотириполосника на базі	

ПТШ2 при включенні його за схемою (В, С).....	60
3.3. Імітансні характеристики чотириполосників на базі	
ПТШ1 та ПТШ2	62
3.3.1. Методи дослідження імітансних	
характеристик чотириполосників.....	62
3.3.2. Імітансні кола чотириполосників на базі ПТШ1	66
3.3.3. Імітансні кола чотириполосників на базі ПТШ2	75
РОЗДІЛ 4. УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ	
ІМІТАНСУ НА ОСНОВІ ПТШ1	91
4.1. Визначення та параметри УПІ	91
4.2. Дослідження УПІ в залежності від режиму	
роботи по постійному струму	106
4.2.1. Дослідження УПІ із спільним витоком в	
залежності від режиму роботи по постійному струму.....	106
4.2.2. Дослідження УПІ із спільним затвором в	
залежності від режиму роботи по постійному струму.....	110
4.2.3. Дослідження УПІ із спільним стоком в	
залежності від режиму роботи по постійному струму.....	114
4.3. Дослідження УПІ в залежності від температури.....	118
4.3.1. Дослідження УПІ із спільним витоком в	
залежності від температури	118
4.3.2. Дослідження УПІ із спільним затвором в	
залежності від температури	118
4.3.3. Дослідження УПІ із спільним стоком в	
залежності від температури	118
РОЗДІЛ 5. УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ	
ІМІТАНСУ НА ОСНОВІ ПТШ2	125
5.1. Дослідження інваріантного коефіцієнта стійкості	125
5.2. Дослідження максимально-досяжного стійкого	
коефіцієнта передачі по потужності	129
5.3. Дослідження максимально-досяжного значення	
негативної дійсної складової перетвореного імітансу	133
5.4. Дослідження коефіцієнта невзаємності	140
5.5. Аналіз граничних і оптимальних частот	
перетворення імітансу	141

РОЗДІЛ 6. КЕРУЮЧІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ПТШ	146
6.1. Керуючі елементи на базі ПТШ	146
6.2. Оцінювання ефективності керуючих елементів	147
6.2.1. Ефективність керуючих елементів на базі ПТШ1	147
6.2.2. Ефективність керуючих елементів на базі ПТШ2	150
6.3. Керовані атенуатори	155
6.4. Комутатори	161
6.4.1. Класифікація і основні параметри висоочастотних комутаторів	162
6.4.2. Напівпровідникові швидкодійні комутатори	164
6.4.3. Тверdotілі мікроелектромеханічні НВЧ-комутатори	166
6.4.4. Комутатори на основі УП	171
РОЗДІЛ 7. ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ПТШ	173
7.1. Інтегральні котушки індуктивності	173
7.1.1. Напівпровідникові індуктивності на базі ПТШ1	181
7.1.2. Напівпровідникові індуктивності на базі ПТШ2	183
7.2. Інтегральний коливальний контур – базовий елемент НВЧ пристроїв	191
7.3. Частотновибіркові пристрої	195
7.3.1. Фільтри на основі активних індуктивностей	197
7.3.2. Активно-зв’язані пасивні резонатори	199
7.3.3. Технології з використанням негативного опору і активних кіл зворотного зв’язку	199
7.3.4. Трансверсальні (поперечні) і рекурсивні фільтри	200
7.3.5. Моделювання і дослідження активних НВЧ фільтрів	202
7.3.6. Дослідження взаємних і невзаємних безіндуктивних фільтрів на основі ПТШ2	206
7.3.7. Дворезонаторний фільтр на двовитоковому ПТШ	210
7.4. Експериментальні дослідження	211
РОЗДІЛ 8. ГЕНЕРАТОРНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ПТШ	213
РОЗДІЛ 9. ПОМНОЖУВАЧІ ІНДУКТИВНОСТІ НА ОСНОВІ ПТШ	222
9.1. Теоретичне обґрунтування	222
9.1.1. Оптимізація параметрів помножувача індуктивності	224

9.1.2. Аналітичне обґрунтування вимог до параметрів чотириполосників для використання їх в якості помножувачів індуктивності	225
9.1.3. Визначення оптимального значення перетвореного імітансу	228
9.1.4. Розрахунок максимально-досяжного коефіцієнта множення індуктивності	230
9.2. Помножувачі індуктивності на польовому транзисторі Шотткі	231
РОЗДІЛ 10. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПТШ ТА ПРИБОРІВ НА ЙОГО ОСНОВІ	233
10.1. Вимірювання коефіцієнта нестійкості	233
10.1.1. Аналіз методів вимірювання	233
10.1.2. Теоретичне обґрунтування способу вимірювання	234
10.1.3. Експериментальні установки	236
10.2. Вимірювання імітансних характеристик чотириполосників	239
10.3. Вимірювання максимально-досяжного стійкого коефіцієнта передачі по потужності	245
10.4. Експериментальна установка для вимірювання максимально досяжних значень негативної дійсної складової перетвореного імітансу	247
ЛІТЕРАТУРА	250

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- BiCMOS – біполярна КМОП-структура
CMOS(КМОП) – комплементарна МОП-структура
GaAs – арсенід галію
HEMT – технологія виготовлення транзисторів з високою рухливістю електронів
MEMS – технологія мікроелектромеханічних систем
PHEMT – польовий транзистор з високою рухливістю електронів
АЛЗ – активна лінія затримки
АР – антенна решітка
АФ – активний фільтр
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика
ВДО – від’ємний диференційний опір
ВП – вимірювальний перетворювач
ІП – інформаційний пристрій
ІПК – інформаційний пристрій керування
ІПП – інформаційний пристрій перетворення
ІС – інтегральна схема
К – комутаційний пристрій
КЕ – керуючий елемент
КЕА – керований електронний атенуатор
ЛП – логічний пристрій
НВЧ – надвисокі частоти
ПД – пристрій декодування
ПК – пристрій кодування
ПТ – польовий транзистор
ПТШ – польовий транзистор Шоттки
ПТШ1 – одностворний ПТШ
ПТШ2 – двостворний ПТШ
РХ – регульовальна характеристика
СЗФ – смуго-запірний фільтр
СПФ – смуго-пропускний фільтр
СЧ – складно-частотний фільтр
СЧ – синтезатор частоти
УП – узагальнений перетворювач імітансу
ФАР – фазована антенна решітка
ФВЧ – фільтр верхніх частот
ФНЧ – фільтр нижніх частот

ВСТУП

Досягнення високих технічних характеристик в існуючих інформаційних пристроях відбувається за рахунок збільшення їх складності, габаритів, маси і вартості. Розвиток інтегральної технології та освоєння нових частотних діапазонів (міліметровий діапазон НВЧ) поставив дві важливі задачі: підвищення надійності і зменшення габаритних розмірів при збереженні високих електричних параметрів.

При розв'язання задачі мініатюризації найбільш значні складності виникли при створенні частотно-вибіркових елементів в інтегральному виконанні. Частотна вибірковість елементів залежить від добротності компонентів, що в них входять. З підвищенням частоти та зменшенням розмірів добротність реактивних елементів зменшується, що приводить до погіршення вибірковості. Особливо сильно зменшується добротність котушок індуктивності. Таким чином, для створення частотно-вибіркових елементів в інтегральному виконанні необхідно використовувати такі методи і засоби побудови схем, електричні параметри яких не залежали б від геометричних розмірів. Таким вимогам відповідають комбіновані динамічні негатрони Шоттки, які створені на основі узагальнених перетворювачів імітансу (УПІ). Такий напрямок – негатроніка, відноситься до області функціональної електроніки, в якій використовується від'ємний опір різних твердотільних структур [1].

Засновником цього напрямку є О. В. Лосєв, який вперше знайшов, дав визначення і застосував для генерації і підсилення електромагнітних коливань негативний опір напівпровідникових кристалів [2]. Значний внесок у розвиток цього напрямку внесли У. Шоклі (W. Shockley), Ганн (J.B. Gunn), Л. Есаки (L. Esaki), С. А. Гаряїнов, І. Д. Абезгауз, Ф. Бенінг (F. Bening), В. Рід (W.T. Read), Діл (H. Dill), В. П. Дьяконов, А. С. Тагер, Л. Н. Степанова, О. Н. Негоденко, Ф. Д. Касимов, В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, П. А. Молчанов, В. М. Кичак, В. І. Стафеев, М. А. Філінюк та ін. У публікаціях цих вчених узагальнено результати як теоретичних, так і практичних досліджень різних видів негатронів і їх застосування.

В рамках наукового напрямку «Негатроніка» постійно ведуться дослідження з метою підвищення ефективності інформаційних при-

строїв. Найбільш перспективним є розробка динамічних негатронів на основі польового транзистора Шотткі. Польовий транзистор є найбільш високочастотною структурою. У нього кращі, в порівнянні з біполярними, параметри (більша швидкодія, високий вхідний опір; квадратичні вольт-амперні характеристики; висока температура стабільності; малий рівень шумів, він має планарний характер, що забезпечує виготовлення на його основі інформаційних пристроїв у вигляді напівпровідникових інтегральних мікросхем. Існуючі роботи досліджують використання комбінованих динамічних негатронів на основі ПТШ в сантиметровому діапазоні НВЧ. В міліметровому діапазоні в ПТШ починає проявлятися ефект Ганна, що спричиняє можливість створення від'ємного диференційного опору самою структурою, і, як наслідок, можливість реалізації нових ефективних інформаційних пристроїв.

Автори висловлюють щире подяку редактору С. А. Малішевській за доброзичливість та професіоналізм при підготовці цієї книги до видання.

РОЗДІЛ 1. ВИЗНАЧЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ

1.1. Визначення та класифікація інформаційних пристроїв

Технічні системи, призначені для отримання, перетворення, передачі, накопичення, відображення та зберігання інформації, що надходить від об'єкта спостереження та керування, називаються інформаційними системами [3]. До них відносяться: автоматизовані системи контролю та керування, системи електронно-обчислювальної та інформаційно-вимірювальної техніки, системи зв'язку, телемеханічні, навігаційні та телевізійні системи і т. п.

Будь-яка інформаційна система складається з окремих простих інформаційних пристроїв (ІП), що призначені для реалізації інформаційних процесів малої складності. Інформаційні пристрої, алгоритм функціонування яких не залежить від алгоритму функціонування інформаційної системи, призначені для перетворення повідомлень в сигнал і навпаки, а також для зміни фізичної природи або параметрів сигналу, називають інформаційними пристроями перетворення (ІПП). Прикладами таких пристроїв є: пристрої кодування та декодування, вимірювальні перетворювачі, акусто-електричні та електронно-оптичні перетворювачі, перетворювачі імітансу, логічні пристрої і т.п.

Інформаційні пристрої, алгоритм функціонування яких змінюється з часом за законом, який визначається алгоритмом функціонування інформаційної системи (тобто відбувається керування алгоритмом функціонування), називають інформаційними пристроями керування (ІПК). Прикладами таких пристроїв є: комутатори, керовані атенюатори, фазообертачі, фільтри і т. п.

Враховуючи, що в більшості інформаційних систем основним носієм інформації є електричний сигнал, в подальшому розглядаються ІП перетворення та керування електричними сигналами. Узагальнена функціональна схема цих пристроїв показана на рис. 1.1. Пристрої мають три основні групи виводів: вхідного сигналу, вихідного сигналу та сигналу керування. В ІПП відсутні виводи сигналу керування, але

можуть бути виводи опорного сигналу.

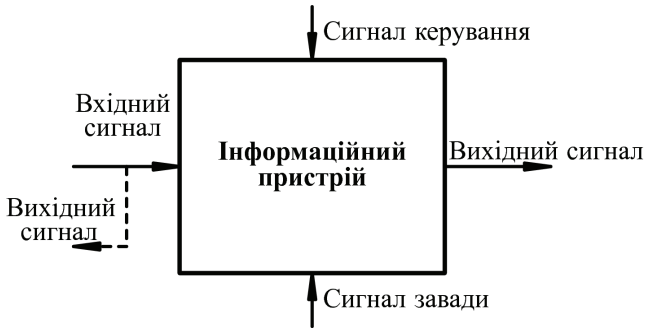


Рис. 1.1. Узагальнена функціональна схема інформаційного пристрою

Крім інформаційних сигналів в ІП потрапляє сигнал завади. Він може потрапляти як по колах основного сигналу та сигналу керування, так і по колах живлення або породжуватись в самому ІП.

Класифікація ІП на базі комбінованих транзисторних негатронів Шоттки відповідно до області досліджень представлена на рис. 1.2.

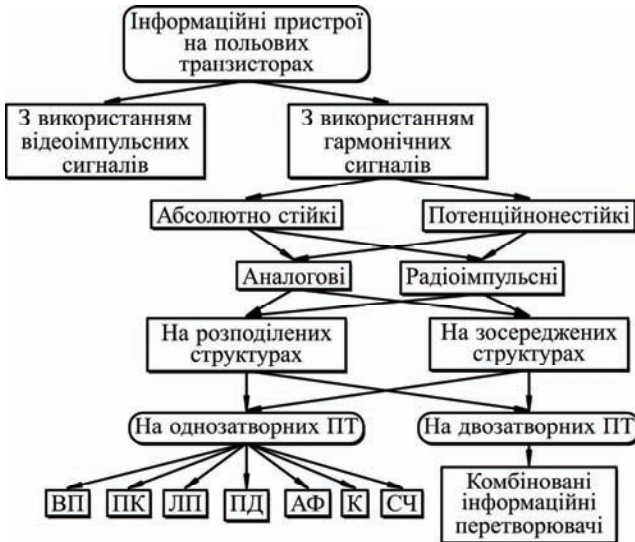


Рис. 1.2. Класифікація інформаційних пристроїв на базі польових транзисторів

Основним елементом в запропонованій класифікації є ІІ на базі польового транзистора (ІІТ). В залежності від виду електричних сигналів, всі ІІ поділяються на ІІ, що використовують відеоімпульсні сигнали та на ІІ, що використовують гармонічні сигнали [4–6]. Інформаційні пристрої другого виду підрозділяються на аналогові та радіоімпульсні.

В залежності від співвідношення параметрів, всі ІІ можна розподілити на абсолютно стійкі і потенційно-нестійкі. До них відносять і ІІ з від’ємним диференційним опором (ВДО).

В загальному випадку всі ІІ з ВДО є елементами з розподіленими параметрами. Але, в залежності від співвідношення між довжиною електромагнітної хвилі в них λ та їх геометричними розмірами, вони підрозділяються на структури з розподіленими та з зосередженими параметрами. Коли довжина хвилі λ сумірна з геометричними розмірами напівпровідникового кристала – їх розглядають як структури із розподіленими параметрами [7]. Під напівпровідниковими структурами з зосередженими параметрами розуміють такі, геометричні розміри яких значно менші від довжини хвилі λ електромагнітних коливань в них [8].

В залежності від кількості затворів ІІ на ІІТ поділяють на ІІ з одностворними та двозатворними транзисторами. Сьогодні схеми на польових транзисторах знаходять застосування в ІІ, які можна поділити на сім основних груп. Це вимірювальні перетворювачі (ВП), пристрої кодування (ПК) – модулятори, пристрої декодування (ПД) – демодулятори, активні фільтри (АФ) та лінії затримки (АЛЗ), комутаційні пристрої (К), логічні пристрої (ЛІІ), синтезатори частоти (СЧ). Класифікація цих груп ІІ, технічні вимоги до них і система робочих параметрів розглянуті в роботах [3, 9–17].

1.2. Критеріальна оцінка стану стійкості інформаційного пристрою

Потенційна нестійкість УІІ ставить задачу визначення умов стійкості, оскільки режим роботи електронної схеми в цьому випадку може бути як стійким, так і нестійким. Основи загальної теорії стійкості

були закладені видатним російським математиком О.М. Ляпуновим, який в 1892 р. випустив книгу «Общая задача об устойчивости движения», що неодноразово перевидавалася [18]. В теорії стійкості розрізняють стійкість «у малому», стійкість «у великому», стійкість «у цілому», стійкість за Ляпуновим, асимптотичну, орбітальну, робастну, абсолютну та умовну стійкості [19–22]. У більшості практичних задач виконують дослідження стійкості «у малому».

Процеси в реальних системах в більшості випадків описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Проте часто дослідження стійкості «у малому» здійснюється за рівняннями першого наближення. У відповідності до теорем О. М. Ляпунова [23], якщо хоча б один корінь характеристичного рівняння (при дійсних коренях) буде додатним, або буде додатною дійсна частина комплексних коренів, то це буде свідчити про те, що приріст, який виникає буде не зменшуватися, а збільшуватися з часом, тобто рух, який досліджується, буде нестійким. Якщо ж всі дійсні корені характеристичного рівняння будуть від'ємними, а всі комплексні корені будуть мати від'ємні дійсні частини, то рух, який досліджується, буде стійким. При наявності нульового кореня та (або) чисто уявних коренів для дослідження стійкості необхідно враховувати також і другий степінь приросту, тобто відкинуті при лінеаризації члени.

Оскільки, не всі нелінійні рівняння можуть бути лінеаризовані, то, відповідно, і метод лінеаризації, або перший метод Ляпунова, не завжди можна застосовувати. Зокрема, цей метод не можна застосовувати до систем з суттєво нелінійними ланками. В даному випадку дослідження стійкості «у великому» та орбітальної стійкості виконують, в основному, шляхом аналізу ходу інтегральних кривих на фазовій площині або шляхом використання прямого (другого) методу Ляпунова. Питання дослідження стійкості нелінійних систем розглянуті в роботах [24–26].

Дослідження стійкості здійснюють аналітичним шляхом, на математичних чи фізичних моделях. Аналітичний аналіз стійкості лінійних (лінеаризованих) систем шляхом прямого знаходження коренів характеристичного рівняння зустрічається з практичними труднощами, що пов'язані з відсутністю аналітичних виразів для коренів рівнянь сте-

пеня вище четвертого, для рівнянь третього та четвертого порядків існуючі вирази малозручні. Тому використовують критерії стійкості, що дозволяють робити висновки про розташування коренів, а відповідно, і про стійкість системи без розв'язання характеристичного рівняння. Опис різних критеріїв стійкості наведений в літературі [20, 23, 24, 27, 28]. Всі вони математично еквівалентні, оскільки відповідають на питання – чи всі корені характеристичного рівняння розміщені в лівій напівплощині. Практичне використання того, чи іншого критерію визначається характером задачі та засобами, що має дослідник.

Існуючі критерії стійкості поділяються на дві групи: алгебраїчні та частотні критерії. Алгебраїчні критерії стійкості дозволяють робити висновок про стійкість системи за коефіцієнтами характеристичного рівняння. Створення алгебраїчних критеріїв пов'язано з іменами англійського математика Рауса (1877 р.) та швейцарського математика Гурвіца (1895 р.) – критерій Рауса–Гурвіца [23]. Алгебраїчні критерії застосовують для систем з кінцевим числом зосереджених параметрів. У випадку комплексних коефіцієнтів характеристичних рівнянь про стійкість системи можна судити за допомогою критерію Ерміта–Гурвіца. Використання цифрових обчислювальних машин привело до появи специфічного алгебраїчного критерію стійкості В. І. Зубова [30, 31].

До недоліків алгебраїчних критеріїв слід віднести значний об'єм обчислювальних операцій та складність виразів, що мають місце при встановленні впливу зміни параметрів системи на її стійкість в тих випадках, коли порядок рівнянь високий.

Частотні критерії стійкості дозволяють робити висновок про стійкість систем за видом їх частотних характеристик. Ці критерії є графоаналітичними і знайшли широке використання, бо дозволяють відносно легко досліджувати стійкість систем високого порядку, а також мають просту геометричну інтерпретацію та наочність. Частотні критерії стійкості можна застосовувати для систем з розподіленими параметрами. Поміж частотних критеріїв стійкості можна виділити критерій Михайлова [32, 33], критерій Найквіста та імітансний критерій стійкості [28].

В теорії радіочастотних підсилювальних пристроїв найчастіше використовують імітансний критерій стійкості. Імітансний критерій

стійкості відноситься до групи частотних критеріїв, за допомогою яких висновок про стійкість кола робиться шляхом аналізу характеристичного багаточлена кола або функції, що виражається через нього, в області дійсних частот ($p = j\omega$). В якості такої функції в імітансному критерії стійкості розглядається імітанс $W(p)$, який визначається між деякими двома полюсами кола. Імітансний критерій стійкості можна сформулювати як наслідок, що витікає з більш загального критерію Михайлова [28]. Використання цього критерію доцільно в тих випадках, коли складання характеристичного рівняння кола або визначення таких функцій кола, як зворотна різниця або зворотне відношення є важко здійсненним, а функція імітансу кола розраховується або вимірюється з високою точністю.

Імітансний критерій стійкості був запропонований ще до появи критеріїв Найквіста (1932 р.) та Михайлова (1938 р.) і застосовувався в роботах В.І. Сифорова (1931 р.) [34], Н.І. Чистякова [35] та інших. В роботі А. А. Куліковського [28] обґрунтовано використання цього критерію для дослідження стійкості активних лінеаризованих кіл. Імітансний критерій стійкості можна застосовувати для кіл, у яких раціональна функція $W(j\omega)$ не має полюсів в правій напівплощині p , а степінь полінома чисельника $W(j\omega)$ відрізняється від степеня полінома знаменника не більше ніж на одну одиницю [36].

При дослідженні стійкості систем часто необхідно не тільки встановити факт існування стійкості або нестійкості системи, але і визначити межі зміни значень одного або декількох параметрів в області, у межах якої система є стійкою або нестійкою. Знання області стійкості або нестійкості системи (особливо, якщо ці параметри можливо налаштувати) має велике практичне значення, бо дозволяє в процесі проектування або налаштування правильно вибрати параметри системи.

Для дослідження впливу різних параметрів системи на її стійкість розроблено спеціальні методи:

1. Аналіз переміщення коренів характеристичного рівняння в площині коренів та побудова кореневих годографів – метод кореневого годографа [37–39];
2. Побудова областей стійкості в просторі параметрів системи або

коефіцієнтів характеристичного рівняння.

До переваг методу кореневого годографа можна віднести наочність та простоту дослідження впливу окремих параметрів системи на її динамічні властивості. До недоліків методу можна віднести те, що для знаходження коренів замкнутої системи необхідно знати корені розімкнутої системи та хоча б один корінь замкнутої системи, що не завжди є зручним. Цей метод добре розроблений для характеристичних рівнянь з дійсними коефіцієнтами.

При побудові областей стійкості в просторі параметрів системи або коефіцієнтів характеристичного рівняння для знаходження границь областей можна використовувати будь-який критерій стійкості. Використання критерію стійкості Гурвіца вважається доцільним, якщо характеристичне рівняння замкнутої системи має невисокий порядок, тобто $n \leq 4$. В іншому випадку обчислення можуть виявитися занадто складними. Критерій Михайлова можна використовувати при будь-якому порядку характеристичного рівняння. Метод побудови областей стійкості для одного та двох параметрів, які входять лінійно в характеристичне рівняння, був запропонований Ю.І. Неймарком [40, 41] і названий ним метод D-розбиття. Цінність D-розбиття, як методу побудови границь стійкості, в тому, що він дозволяє відразу визначити точні границі області стійкості на площині параметрів, тобто метод не потребує будь-якої спрямованої процедури для знаходження першої точки границі. Побудова D-розбиття та виділення області стійкості справедливе як у випадку дійсних, так і комплексних коефіцієнтів (параметрів) характеристичного рівняння. Але властивості методу такі, що окрім дійсних кривих, з'являються додаткові, які ускладнюють визначення потрібної області. Недоліком методу є також його недостатня універсальність, змінні параметри повинні входити в коефіцієнти характеристичного рівняння лінійно. Метод D-розбиття може бути в значній мірі вдосконалений та орієнтований на використання ЕОМ. Одним з можливих шляхів вдосконалення методу є використання поліномів Чебишева [22]. Використання ЕОМ також дозволяє виконувати побудову областей стійкості простим перебиранням великої кількості точок на площині параметрів та визначенням числа коренів в правій напівплощині на основі критерію Рауса [27].

Використання сучасної обчислювальної техніки для аналізу стійкості систем дозволяє значно спростити та прискорити процедуру одержання кінцевих результатів, підвищити інформаційну цінність як багатьох традиційних методів, так і нових, поширити їх на системи більшої розмірності, виконувати дослідження не тільки за одним, але і за декількома параметрами, здійснити сервісне представлення результатів у вигляді графіків, таблиць, розрахункових даних. При цьому можна використовувати також і методи безпосереднього знаходження коренів (Ньютона, Мюлера, Берстоу) [42]. Судити про стійкість деякої системи можна також шляхом комп'ютерного моделювання її роботи. Для моделювання роботи електронних схем можна використовувати такі відомі програми як PSpice, MicroCap, Electronics WorkBench, MicroWave Office та інші [43].

Використання наведених критеріїв стійкості дозволяє зробити висновки, чи всі нулі лежать в лівій напівплощині p , але ці критерії не показують наскільки віддалені нулі від границі правої напівплощини (від осі дійсних частот $j\omega$), тобто наскільки віддалена система від нестійкого стану. Таку віддаленість системи від нестійкого стану можна характеризувати ступенем стійкості ξ , поняття про яку ввів Я.З. Ципкін [44, 45].

При використанні частотного критерію стійкості Найквіста для оцінки ступеня стійкості системи вводять поняття запасів стійкості за фазою та за модулем, під якими розуміють відстань між годографом $W(j\omega)$ та критичною точкою $(-1; j0)$ [23]. Відзначимо простоту та наочність визначення запасу стійкості системи в цьому випадку.

При використанні імітансного критерію стійкості для оцінки запасу стійкості системи використовують коефіцієнт стійкості, який характеризує відносну віддаленість сумарного дійсного імітансу ReW_{Σ} від точки перетворення в нуль. Форма коефіцієнта може бути різною в залежності від міркувань, що покладені в основу його визначення [28, 46–52]. Найбільш зручним є коефіцієнт внутрішньої стійкості активного чотириполюсника в формі, яку запропонував Роле [51]:

$$K_{\text{вн.с}} = \frac{2ReW_{11}ReW_{22} - Re(W_{12}W_{21})}{|W_{12}W_{21}|}, \quad (1.1)$$

де W_{11} , W_{22} , W_{12} , W_{21} – імітансні параметри чотириполосника, що розглядається в якості квазілінійного. Під імітансом W розуміють повний опір або повну провідність, що відповідає одній з Y -, Z -, h - або g -систем параметрів чотириполосника. Індекс при $K_{\text{вн.с}}$ вказує на те, що цей коефіцієнт залежить тільки від внутрішніх параметрів найактивнішого чотириполосника. Величини $K_{\text{вн.с}}$ лежать в межах інтервалу $(-1; +\infty)$. Активний чотириполосник є стійким, якщо $K_{\text{вн.с}} \geq 1$ і потенційно-нестійким при $K_{\text{вн.с}} < 1$. Границі потенційної стійкості відповідає значення $K_{\text{вн.с}} = 1$.

В такій формі коефіцієнт внутрішньої стійкості чотириполосника $K_{\text{вн.с}}$ має простий зв'язок з максимально досяжним коефіцієнтом передачі активного чотириполосника за потужністю та, що є дуже важливим, є інваріантним до виду W -матриці [36]. Останнє означає, що числове значення $K_{\text{вн.с}}$ не залежить від вибору системи параметрів: при використанні будь-якої системи, наприклад Y -, Z -, h - або g -параметрів, чисельна величина $K_{\text{вн.с}}$ для цього чотириполосника (за однакових інших умов) буде однаковою.

Визначення коефіцієнта внутрішньої стійкості $K_{\text{вн.с}}$ чотириполосника можна здійснити декількома методами та засобами: вимірюванням W -параметрів чотириполосника [51]; вимірюванням коефіцієнтів прямої $K_{\text{ном}21}$ та зворотної $K_{\text{ном}12}$ передач чотириполосника в режимі двостороннього узгодження [53]; або вхідного (вихідного) імітансу $W_{\text{вх}}$ ($W_{\text{вих}}$) чотириполосника при зміні в широких межах його реактивного навантаження ImW_n (ImW_2) [54].

При використанні першого методу, для вимірювання W -параметрів чотириполосника можна використовувати відомі методи та вимірювальну апаратуру [55-57]. При цьому виникають труднощі при виконанні в широкому частотному діапазоні умов короткого замикання та холостого ходу, а також в забезпечені стійкості вимірювальної установки при дослідженні потенційно-нестійких чотириполосників. Такі труднощі можуть бути усунуті при використанні нестандартної системи W -параметрів чотириполосника [58–60].

Другий метод визначення коефіцієнта внутрішньої стійкості чотириполосника припускає, що $K_{\text{вн.с}} > 1$, що не досяжно для потенційно-нестійких чотириполосників.

При використанні третього методу визначення $K_{\text{вн.с}}$ будується коло геометричного місця складових вхідного імітансу $W_{\text{вх}}$ чотиріполюсника на комплексній площині в залежності від величини уявної складової імітансу навантаження ImW_n . Інваріантний коефіцієнт стійкості визначається з формули:

$$K_{\text{вн.с}} = \frac{ReW_{0\text{вх}}}{\rho_{\text{вх}}}, \quad (1.2)$$

де $ReW_{0\text{вх}}$ – відстань від уявної осі координат до центра кола $W_{\text{вх}} = f(ImW_n)$; $\rho_{\text{вх}}$ – радіус цього кола.

Недолік цього методу полягає в необхідності проведення великої кількості вимірювань вхідного імітансу для побудови кола $W_{\text{вх}} = f(ImW_n)$, при цьому можливе заходження в область від'ємних значень $ReW_{\text{вх}}$, що може призвести до втрати стійкості вимірювальної установки.

В [58, 61, 62] запропоновано методи та засоби визначення $K_{\text{вн.с}}$ чотиріполюсників, де відсутні недоліки вище перерахованих методів, та які забезпечують стійкість вимірювальної установки з потенційно-нестійким чотиріполюсником на НВЧ в усьому діапазоні його потенційної нестійкості. Встановити факт нестійкості електронного пристрою можна також за допомогою електронного осцилографа за осцилограмами сигналів на вході та виході пристрою.

Для оцінки стійкості нелінійних систем автоматичного керування, які допускають лінеаризацію, в роботах [26, 63] запропоновано ряд алгоритмів та пристроїв на основі Фур'є-інтегрального методу ідентифікації. Критеріям та умовам стійкості електронних кіл приділено багато уваги також в роботах закордонних авторів [64–69].

Проведений аналіз показав наявність досить великої кількості методів, що можуть бути використанні для дослідження стійкості інформаційних пристроїв. Вибір того чи іншого методу виконується з урахуванням специфіки задачі, умов її вирішення, засобами, які має дослідник, зручністю використання тощо. Бажано, щоб метод був як можна простішим, але при цьому забезпечував вирішення всіх поставлених задач. Так дослідження стійкості простих електронних схем з L-, C-негатронами, визначення умов стійкості та можливих режимів роботи найбільш зручно виконувати за допомогою критерію стійкості

Рауса–Гурвіца з застосування його для визначення границь областей стійкості в площині параметрів системи. Для аналізу стійкості електронних схем з R-негатронами вказані вимоги, в більшості випадків, задовольняє імітансний критерій стійкості, який широко використовується при аналізі таких схем. Для аналізу елементів автоматики на базі L-, C-негатронів імітансний критерій стійкості не підходить, оскільки він враховує лише наявність від'ємного активного опору, і не враховує від'ємні ємності та індуктивності [70].

РОЗДІЛ 2. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ШОТТКІ

Найбільш високочастотною реальною уніполярною багатоелектродною напівпровідниковою структурою є польовий транзистор Шотткі (ПТШ). Гранична частота таких транзисторів досягає 250–350 ГГц [71]. Перевагою цих структур є їх планарний характер, що забезпечує виготовлення на їх основі інформаційних пристроїв у вигляді напівпровідникових НВЧ інтегральних мікросхем.

2.1. Властивості та характеристики переходу метал–напівпровідник

В основі роботи ПТШ лежать фізичні процеси, що відбуваються в області контакту метал–напівпровідник. Протягом тривалого часу використання контакту метал–напівпровідник вчені багатьох країн розробили різні теорії, які задовільно описують поведінку такого контакту, який отримав назву перехід Шотткі, при прямому і зворотному зміщеннях. Розглянемо деякі з теорій, які широко застосовуються в цей час, використовуючи енергетичну діаграму контакту метал–напівпровідник з бар'єром Шотткі (рис. 2.1).

2.1.1. Теорія термоелектронної емісії

Діодна теорія контакту метал–напівпровідник [72–76] була розроблена в 1942 р. американським фізиком Бете, що виходив із припущення, що висота бар'єра набагато перевищує величину kT . При цьому він нехтував зіткненнями в шарі об'ємного заряду, не враховував сил дзеркального зображення та вважав, що довжина вільного пробігу носіїв набагато більша від товщини шару об'ємного заряду.

При використанні стандартного рівняння термоелектронної емісії був отриманий вираз для щільності струму з напівпровідника в метал

$$J_{nm} = A^* T^2 \exp(-\varphi_{00}/\varphi_m) \exp(U/\varphi_m),$$

де $A^* = 4\pi q m^* k^2 / h^3$ – постійна Річардсона; h – постійна Планка; m^* –

ефективна маса електрона; $\varphi_m = kT/q$; k – постійна Больцмана; q – заряд електрона; T – абсолютна температура; U – напруга прикладена до переходу.

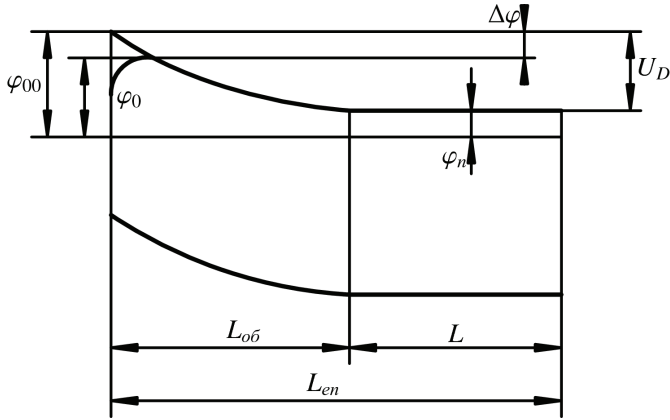


Рис. 2.1. Енергетична діаграма контакту метал–напівпровідник з бар'єром Шотткі: φ_{00} – висота потенціального бар'єра контакту метал–напівпровідник без врахування ефекту Шотткі; $\Delta\varphi$ – зменшення висоти потенціального бар'єра, викликане дією сил дзеркального зображення і електричного поля; φ_n – різниця між енергіями зони провідності і рівня Фермі в об'ємі напівпровідника; $L_{об}$ – товщина шару об'ємного заряду; $L_{ен}$ – товщина епітаксialного шару; $L = L_{об} - L_{ен}$ – товщина квазінейтральної області

Щільність струму з металу в напівпровідник не залежить від прикладеної напруги і дорівнює $J_{нс}$ при $U = 0$, тому можна записати

$$J_{мн} = -A^*T^2 \exp(-\varphi_{00}/\varphi_m).$$

Тоді щільність струму діода дорівнює

$$J = J_{нс} [\exp(U/\varphi_m) - 1], \quad (2.1)$$

де $J_{нс} = A^*T^2 \exp(-\varphi_{00}/\varphi_m)$ – щільність струму насичення електронів.

При врахуванні сил дзеркального зображення вольт-амперну характеристику (ВАХ) діода Шотткі можна записати у вигляді [72]

$$J = J_{нс0} [\exp(U/n\varphi_m) - 1], \quad (2.2)$$

де $J_{нс0} = A^*T^2 \exp[-(\varphi_{00} - \Delta\varphi)/\varphi_m] = A^*T^2 \exp(-\varphi_0/\varphi_m)$;

$$\Delta\varphi = \sqrt{(q/4\pi\epsilon)(2qN_D/\epsilon_n)}^{1/4} (U_D - U - \varphi_m)^{1/4};$$

n – коефіцієнт неідеальності ВАХ;
 ε – діелектрична проникність;
 N_D – концентрація іонізованих донорів;
 U_D – дифузійний потенціал;
 ε_n – діелектрична проникність напівпровідника.

2.1.2. Дифузійна теорія

Для напівпровідників, у яких довжина вільного пробігу значно менша від товщини шару об'ємного заряду, німецьким фізиком Шотткі була розроблена дифузійна теорія [72–76].

Розв'язуючи рівняння Пуассона і рівняння для щільності струму в області об'ємного заряду, ним одержано вираз

$$J = J_{SD} [\exp(U/\varphi_m) - 1] / \{1 - \exp[-2(U_D - U)/\varphi_m]\}, \quad (2.3)$$

де $J_{SD} = \frac{qD_n N_c}{\varphi_m} \left[\frac{q(U_D - U) 8\pi N_D}{\varepsilon_n} \right]^{1/2} \exp \frac{-\varphi_{00}}{\varphi_m}$ – щільність струму насичення; D_n – коефіцієнт дифузії електронів; N_c – ефективна щільність станів у зоні провідності.

Відповідно до дифузійної теорії форма і висота потенціального бар'єра впливають на струм, що протікає. Аналіз виразів (2.1) і (2.3) показує, що щільності струмів насичення J_{ns} і J_{SD} відрізняються одна від одної.

2.1.3. Теорія термоелектронної емісії – дифузії

В основі цієї теорії [77, 78] лежить врахування швидкості термоелектронної рекомбінації v_R на границі метал–напівпровідник. В ній також враховується розсіювання на оптичних фотонах, квантовомеханічне відбиття і тунелювання. Енергетична діаграма контакту метал–напівпровідник показана на рис. 2.2. В області між x_m і $L_{об}$ величина щільності струму визначається таким виразом:

$$J = q\mu_n N (d\varphi_{\phi_n}/dx), \quad (2.4)$$

де $N = N_c \exp[-(\varphi_{\phi_n} - \varphi)/\varphi_m]$ – щільність у точці x ; μ_n – рухливість

Наукове видання

**Філінюк Микола Антонович
Куземко Олександр Михайлович
Ліщинська Людмила Броніславівна**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ПОТЕНЦІЙНО-
НЕСТІЙКИХ БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ШОТТКИ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Куземком

Підписано до друку 9.12.2009 р.
Формат 29,7x42 1/4 Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний Ум. др. арк. 16,44.
Наклад 100 прим. Зам. № 2009-201.

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/483>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>