

Теоретичні основи комп'ютерних напівпровідникових електронних компонентів



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНИХ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ**

Вінниця
ВНТУ
2015

УДК 621.382(075)

ББК 32.844.1 я 73

Т33

Автори:

Азаров О. Д., Гарнага В. А., Сапсай Т. Г., Тарасенко В. П.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Комп'ютерна інженерія» (Лист № 1/11-14495 від 10.09.2014 р.)

Рецензенти:

І. А. Жуков, доктор технічних наук, професор

Ю. В. Кравченко, доктор технічних наук, професор

С. Д. Погорілий, доктор технічних наук, професор

Т33 **Теоретичні основи комп'ютерних напівпровідникових електронних компонентів** : навчальний посібник. / [Азаров О. Д., Гарнага В. А., Сапсай Т. Г., Тарасенко В. П.] – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 135 с.

У посібнику в доступній формі розглядаються електронні компоненти аналогових і цифрових інтегральних схем. Аналізуються статичні і динамічні характеристики як пасивних компонентів, типу інтегральних резисторів і конденсаторів, так і активних – біполярних і польових транзисторів. Розглядаються схеми вмикання типових транзисторних каскадів, а також їх функціонування у статичному і динамічному режимах. Наводяться моделі компонентів та їх схеми заміщення для різних режимів роботи: мало-сигнального і великого сигналів. Розглядаються методи схемотехнічного аналізу електронних схем у форматі *PSpice* на прикладі інтегрованого пакета MicroCAP. Для сприяння засвоєнню матеріалу у всіх розділах наведено контрольні запитання.

УДК 621.382(075)

ББК 32.844.1 я 73

ISBN 978-966-641-605-9

© О. Азаров, В. Гарнага, Т. Сапсай, В. Тарасенко, 2015

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ПАСИВНІ КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ.....	9
1.1 Пасивні компоненти	9
1.2 Резистори	9
1.2.1 Властивості резисторів.....	9
1.2.2 Тонкоплівкові резистори.....	10
1.2.3 Мемристори.....	10
1.2.4 Шуми резисторів.....	11
1.3 Конденсатори	12
1.3.1 Властивості конденсаторів	12
1.3.2 Тонкоплівкові та конденсатори на основі <i>p-n</i> переходу.....	12
1.4 Контрольні запитання.....	14
РОЗДІЛ 2 ДІОДИ	15
2.1 Властивості діодів.....	15
2.2 Аналітичний опис функціонування діода	17
2.3 Режими роботи	19
2.4 Температурна залежність параметрів	21
2.5 Дискретні та інтегральні діоди.....	23
2.5.1 Інтегральні діоди.....	23
2.5.2 Ізоляція елементів <i>p-n</i> переходом	23
2.5.3 Інтегральний діод із <i>p-n</i> переходом та діод Шотткі.....	23
2.5.4 Дискретні діоди.....	23
2.6 Статичний режим.....	24
2.6.1 Струм витікання	24
2.6.2 Пробій	24
2.6.3 Прямий опір.....	25
2.7 Модель діода в режимі малих сигналів	25
2.8 Контрольні запитання.....	27
РОЗДІЛ 3 БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ	28
3.1 Структура біполярного транзистора.....	28
3.2 Властивості біполярних транзисторів. Режими роботи.....	28
3.2.1 Характеристики транзисторів.....	29
3.2.2 Підсилення струму	30
3.2.3 Залежність підсилення струму. Графік Гуммеля	33
3.2.4 Робоча точка і характеристики транзисторів у режимі малого сигналу	35

3.3	Теплові властивості	39
3.4	Моделі і схеми заміщення біполярних транзисторів	42
3.4.1	Статичні характеристики	42
3.4.2	Модель Еберса-Молла.....	42
3.4.3	Підсилення струму у нормальному та інверсному режимах ...	45
3.4.4	Статична модель транзистора в режимі малих сигналів	47
3.4.5	Малосигнальні схеми заміщення підсилювальних каскадів із керованими генераторами сигналів	49
3.4.6	Об'ємні опори	58
3.4.7	Динамічні характеристики.....	60
3.4.8	Динамічна модель транзистора в режимі малих сигналів.....	61
3.5	Шуми.....	66
3.6	Транзисторні каскади	69
3.6.1	Схема із загальним емітером.....	69
3.6.2	Схема із загальним колектором	71
3.6.3	Схема із загальною базою.....	74
3.6.4	Складені транзистори.....	77
3.7	Контрольні запитання.....	79
РОЗДІЛ 4 ПОЛЬОВІ ТРАНЗИСТОРИ		81
4.1	Властивості польових транзисторів.....	84
4.1.1	Характеристики.....	84
4.1.2	Польовий транзистор як керований резистор.....	86
4.1.3	Робоча точка та режим малих сигналів	88
4.2	Температурні залежності у польових транзисторах	92
4.3	Моделі польових транзисторів	94
4.3.1	Статичні характеристики	95
4.3.2	Шуми.....	97
4.4	Транзисторні каскади	99
4.4.1	Схема із загальним витоком	99
4.4.2	Схема із загальним стоком	104
4.4.3	Схема із загальним заслоном.....	108
4.5	Контрольні запитання.....	111
РОЗДІЛ 5 КОМП'ЮТЕРНИЙ СХЕМОТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ.....		113
5.1	Основи моделювання електронних схем	113
5.2	Види аналізів схемотехнічного моделювання та їх застосування	114
5.2.1	Динамічний аналіз режиму за постійним струмом	115
5.2.2	Аналіз передатних функцій за постійним струмом	117

5.2.3 Динамічний аналіз малосигнальних передатних функцій у частотній зоні	118
5.2.4 Розрахунок перехідних процесів.....	118
5.2.5 Аналіз за змінним струмом на малому сигналі.	119
5.2.6 Чутливість за постійним струмом	121
5.2.7 Малосигнальні передатні функції.....	121
5.2.8 Нелінійні спотворення	122
5.2.9 Інтермодуляційні спотворення.....	123
5.3 Параметри електронних компонентів	124
5.4 Контрольні запитання	133
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	134

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БТ	–	біполярний транзистор
ЕРС	–	електрорушійна сила
ЗБ	–	загальна база
ЗВ	–	загальний витік
ЗЕ	–	загальний емітер
ЗЗ	–	загальний заслін
ЗК	–	загальний колектор
ЗС	–	загальний стік
ІС	–	інтегральна схема
КГС	–	керований генератор струму
ПТ	–	польовий транзистор
РТ	–	робоча точка
ФГС	–	функціональний генератор струму
ФНЧ	–	фільтр низьких частот

ВСТУП

Роль електронних компонентів у сучасній науці і техніці важко переоцінити. Вони справедливо вважаються каталізатором науково-технічного прогресу. Без них неможливі ні успіхи в освоєнні космосу й океанських глибин, ні розвиток атомної енергетики й обчислювальної техніки, ні автоматизація виробництва, ні радіомовлення і телебачення, ні вивчення живих організмів. Мікроелектроніка, наноелектроніка як чергові історично обумовлені етапи розвитку електроніки забезпечують принципово нові шляхи розв'язання нагальних задач у всіх перерахованих галузях.

Електроніка – це галузь науки, техніки і виробництва, що охоплює дослідження і розробку електронних приладів і принципів їхнього використання.

Мікроелектроніка – це розділ електроніки, що охоплює дослідження і розробку певного типу електронних приладів – інтегральних мікросхем – і принципів їхнього застосування.

Наноелектроніка – галузь електроніки, що займається розробкою фізичних і технологічних основ створення інтегральних електронних схем із характерними топологічними розмірами елементів менше 100 нанометрів. Термін “наноелектроніка” логічно пов'язаний з терміном мікроелектроніка і відображає перехід сучасної напівпровідникової електроніки від елементів із характерним розміром в мікронній та субмікронній зонах до елементів із розміром у нанометровій зоні. Проте, принципово нова особливість наноелектроніки пов'язана з тим, що для елементів таких розмірів починають переважають квантові ефекти. З'являється нова номенклатура властивостей, відкриваються нові привабливі перспективи їх використання. Якщо при переході від мікро- до наноелектроніки квантові ефекти в чомусь є паразитними, (наприклад, роботі класичного транзистора при зменшенні розмірів починає заважати тунелювання носіїв заряду), то електроніка, що використовує квантові ефекти, – це вже основа нової, так званої наногетероструктурної електроніки. Водночас, наноелектроніка поки що – електроніка майбутнього.

Інтегральна мікросхема (чи просто інтегральна схема) є сукупністю декількох взаємозв'язаних компонентів (транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів і т. п.), виготовленою в єдиному технологічному циклі (тобто одночасно), на тій самій несучій конструкції – підкладці, що виконує задану функцію перетворення інформації.

Компоненти, що входять до складу ІС і тим самим не можуть бути виділені з неї як самостійні вироби, називаються елементами ІС чи інтегральними елементами. Вони мають деякі особливості порівняно зі «звичайними» транзисторами, резисторами і т. д., що виготовляються у вигляді конструктивно відокремлених одиниць і з'єднуються у схему шляхом паяння. На відміну від інтегральних елементів конструктивно відокремлені прилади і деталі, властиві для «домікроелектронної епохи», будемо називати дискретними

компонентами, а електронні вузли і блоки, побудовані на їхній основі, – дискретними схемами.

В основу розвитку електроніки покладено безупинне ускладнення функцій, виконуваних електронною апаратурою. На певних етапах стає неможливим розв'язувати нові задачі старими засобами, як кажуть, на основі старої елементної бази, наприклад, за допомогою електронних ламп чи дискретних транзисторів. Основними чинниками, що лежать в основі зміни елементної бази, є: надійність, габарити і маса, вартість і потужність. Простий (хоча і нестрогий) розрахунок ілюструє причини переходу від дискретних транзисторів до етапу мікроелектроніки. Розв'язання багатьох поставлених задач тільки засобами дискретної транзисторної техніки є неможливим. Їх можна розв'язати тільки на якісно новій основі, використовуючи таку елементну базу, що забезпечила б на кілька порядків меншу ймовірність відмови, вартість, габарити і т. п. Саме такою елементною базою і є інтегральні схеми.

Вважають, що мікроелектроніка як галузь науки і техніки ні в якому разі не зводиться до технології ІС. Вона інтегрує в собі три рівнозначні аспекти: фізичний, технологічний і схемотехнічний. Знання цих трьох аспектів мікроелектроніки дозволяє розробнику пристроїв або систем комп'ютерної інженерії гнучко оцінювати як нові варіанти елементної бази чи бази схемних рішень (з погляду їхньої технологічної реалізації), так і нові варіанти технологічних процесів (з погляду їхньої придатності для реалізації цих елементів і цих схем).

Залежно від режиму, в якому функціонує активний елемент (БТ, ПТ чи діоди) всі електронні пристрої можна поділити на аналогові та цифрові. Саме тому детальніше варто зупинитися на режимах роботи активних елементів. Так, зокрема, режим малого сигналу – це такий режим, при якому рівні приростів вхідних і вихідних напруг (струмів) електронних компонентів є настільки малими, що практично не викликають змін параметрів схем заміщення, або ці зміни є незначними (одиниці відсотків). Режим великого сигналу – це такий режим, при якому рівні приростів вхідних і вихідних напруг (струмів) є такими, що можуть викликати істотні зміни параметрів схем заміщення (у декілька разів). Перші два режими використовуються в аналоговій і аналого-цифровій схемотехніці. Ключовий режим – це такий, при якому рівні приростів вхідних і вихідних напруг (струмів) викликають кардинальні зміни станів активних елементів: відкритий–закритий, а параметри схем заміщення змінюються на декілька порядків. У першу чергу це стосується опорів і переходів біполярних транзисторів або каналів польових транзисторів. Ключовий режим роботи електронних компонентів використовується переважно у цифровій схемотехніці. Вищевказані аспекти будуть детально розглядатися в міру аналізу характеристик і параметрів компонентів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. / У. Титце, К. Шенк ; [пер. с нем. ДМК Пресс]. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Т. 1. – 832 с.
2. Grebene A. Bipolar and MOS Analog Integrated Circuit Design / Alan B. Grebene – John Willey & Sons, 2003. – 879 p.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники : учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / Степаненко И. П. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.: ил.
4. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. / М. А. Амелина, С. А. Амелин. – Смоленск : НИУ МЭИ, 2012. – 617 с.
5. Амелина М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. / М. А. Амелина, С. А. Амелин – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.
6. Бойт К. Цифровая электроника / Бойт К. – М. : Техносфера. – 2007. – 472 с.
7. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Волович Г. И. – М. : «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
8. Hans Camenzind. Designing Analog Chips / Hans Camenzind. – BookSurge Publishing, 2005. – 242 p.
9. Наундорф У. Аналоговая электроника: Основы, расчет, моделирование / Уве Наундорф ; [пер. с нем. М. М. Ташлицкого]. – М. : Техносфера, 2008. – 472 с.
10. Крерафт Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крерафт, С. Джерджили. – М. : Техносфера, 2005. – 360 с.
11. Азаров О. Д. Комп'ютерна електроніка. Основи теорії транзисторів та транзисторних схем / О. Д. Азаров, В. В. Байко, О. І. Суприган. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 130 с.

Навчальне видання

**Азаров Олексій Дмитрович
Гарнага Володимир Анатолійович
Сапсай Тетяна Григорівна
Тарасенко Володимир Петрович**

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено Гарнагою В. А.

Підписано до друку 16.01.2015 р.
Формат 29,7×42¹/₄. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8,6.
Наклад 300 (1-й запуск 1-100) пр. Зам. 2015-006.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ 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)59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
Серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.



Азаров Олексій Дмитрович - д. т. н., професор, Заслужений працівник освіти і науки України, директор Інституту інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету, автор понад 500 наукових, навчально-методичних праць та винаходів.



Гарнага Володимир Анатолійович - к. т. н., старший викладач кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету, автор понад 60 наукових праць.



Сапсай Тетяна Григорівна - к. т. н., доцент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", автор понад 45 наукових і навчально-методичних праць.



Тарасенко Володимир Петрович - д. т. н., професор, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, голова НМК МОНУ, завідувач кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", автор понад 500 наукових, навчально-методичних праць та винаходів.

