

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
ТЗЗ

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

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

ISBN 978-966-641-605-9

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: малосигнального 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 $p-n$ 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 $p-n$ переходом	23
2.5.3 Інтегральний діод із $p-n$ 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	94
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 назрілих 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

вати 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.

РОЗДІЛ 1 ПАСИВНІ КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

1.1 Пасивні компоненти

Вибір і кількість видів пасивних елементів в інтегральних схемах серйозно обмежені. Основним етапом у технології інтегральних схем є планарний процес. Він добре освоєний для активних приладів. Пасивним же елементам взагалі приділяється другорядне значення. Одночасне створення активних і пасивних елементів приладів у рамках одного технологічного циклу вимагає ряду компромісів як у частині конструювання, так і реалізації. Це, у свою чергу, позначається в обмеженні розмірів і видів пасивних елементів в монолітному оформленні. Деякі такі пасивні елементи, як індуктивності взагалі несумісні з мікромініатюризацією, а конденсатори і резистори мають великий за абсолютним значенням розкид номінальних значень. Крім того, виготовлення елементів можливе лише в обмеженому діапазоні значень номіналів їхніх параметрів.

При переході від схем на дискретних елементах до інтегральних, економічна сторона конструювання часто істотно змінюється. У дискретних схемах вартість і складність виготовлення залежать від необхідного числа активних приладів. У разі монолітного виготовлення зазвичай висуваються вимоги до абсолютного значення або до розмірів пасивних елементів, що може зробити процес конструювання складним або економічно недоцільним.

1.2 Резистори

1.2.1 Властивості резисторів. Резистори належать до елементів компонентів, що застосовуються в електричних схемах електротехніки та електроніки для задання сили струму та поділу напруги. Резистори – найпоширеніші пасивні компоненти електронної апаратури, що використовуються як навантаження, споживачі та подільники в колах живлення, як елементи фільтрів, шунтів, у колах формування імпульсів і т. д.

Резистори характеризуються:

- номінальним значенням електричного опору (від декількох Ом до 1000 ГОм);
- прийнятним відхиленням від нього (0,001...20%);
- максимальною потужністю розсіювання (від сотих часток Вт до декількох сотень Вт);
- граничною електричною напругою та температурним коефіцієнтом електричного опору.

У монолітних схемах застосовуються два типи резисторів: напівпровідникові та тонкоплівкові. Напівпровідникові резистори – найпоширеніші в монолітних структурах. За винятком резисторів з іонним легуванням, вони можуть виготовлятися одночасно з рештою елементів схеми без введення

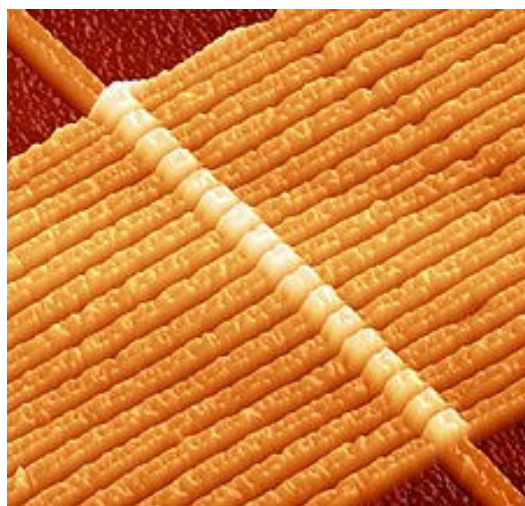
додаткових етапів обробки. Проте мають досить великі допуски і (з точки зору стандартів на дискретні елементи) погані температурні та частотні характеристики. Тонкоплівкові резистори, однак, мають гарні електричні характеристики, але вимагають додаткового етапу обробки.

1.2.2 Тонкоплівкові резистори. Тонкоплівкові резистори являють собою тонку провідникову плівку на поверхні кремнію. Вони можуть бути виготовлені методом нанесення тонких плівок. Порівняно з дифузійними резисторами тонкі плівки мають такі переваги:

1. Низький температурний коефіцієнт;
2. Точніше задання абсолютного значення;
3. Менші значення паразитних параметрів;
4. Високий опір шару.

Головним недоліком тонкоплівкових резисторів є необхідність спеціальних додаткових етапів при їх виготовленні. У деяких випадках до основних етапів виготовлення плівки необхідно ще покриття двоокисом кремнію SiO_2 для захисту резистора від атмосферної дії.

1.2.3 Мемристор. Мемристор (англ. *memristor*, від *memory* – «пам'ять», та *resistor* – «опір») – четвертий базовий елемент електричної ланки (рис. 1.1). Його було запропоновано у вересні 1971 року Леоном Чуа. Це пасивний двополюсник з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ), що має гістерезис. Поряд із трьома відомими базовими пасивними елементами аналогових електричних схем – резистором, конденсатором та індуктивністю – цей пасивний елемент створює повний набір пасивних елементів для виробництва максимально різноманітних пристроїв аналогової та цифрової схемотехніки.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Мемристори: а) ланка із 17 мемристорів, зафіксована атомним сканувальним мікроскопом; б) умовно-графічне позначення мемристора

Практична реалізація ідеї мемристора здійснилась тільки нещодавно співробітниками лабораторії *HP Labs* під керівництвом Р. Стенлі Вільямса фірми *Hewlett-Packard*. Дослідження проводились у галузі наноелектроніки. Прилад складається з двох шарів плівки з діоксиду титану з різною концентрацією атомів кисню. Під дією електричного поля, що прикладається перпендикулярно до плівок, розпочинається дифузія кисню з нижнього (збагаченого) шару у верхній (збіднений). Таким чином, нижній шар, що до того не був провідним, починає проводити струм і залишається в такому стані, поки не буде прикладена обернена напруга. Очевидно, що швидкість перемикання таких мемристорів буде повністю визначатися коефіцієнтом дифузії кисню в діоксиді титану. При виготовленні резистивних смужок використовуються методи нанотехнології.

На думку Грега Шнайдера [1] (спеціаліст компанії HP), мемристор стане одним з основних елементів нанопристроїв, що дозволить забезпечити моделювання роботи людського мозку (мініатюрні нанопристрої будуть об'єднані в єдину мережу, а мемристор стане елементом, відповідальним за «пам'ять» штучного інтелекту) [2].

1.4 Шуми резисторів

Навіть ідеальний резистор при температурі вище абсолютного нуля є джерелом шуму. Це випливає з фундаментальної флуктуативно-дисипативної теореми (у застосуванні до електричних кіл це твердження відоме також як теорема Найквіста). При істотно меншій частоті, ніж $k_B T/h$ (де k_B – стала Больцмана, T – абсолютна температура, h – стала Планка) спектр теплового шуму рівномірний («білий шум»), спектральна густина шуму (перетворення Фур'є від корелятора напруг шуму)

$$|U|_{\omega}^2 = 4Rk_B T,$$

де $U_{\omega}^2 = \int dt \langle U(t)U(0) \rangle e^{i\omega t}$.

Звідси витікає, що чим більший опір, тим більша ефективна напруга шуму. Вона також пропорційна квадратному кореню з температури.

Навіть при абсолютному нулі у резисторів, складених з квантових точкових контактів, має місце шум, який зумовлений Фермі-статистикою. Проте такий шум усувається шляхом послідовного та паралельного підключення кількох контактів.

Рівень шуму реальних резисторів вищий. Тут завжди присутня компонента, інтенсивність якої пропорційна оберненій частоті, тобто $1/f$. Цей шум виникає з кількох причин, одна з головних – перезарядка іонів домішок, на яких локалізовані електрони.

Шуми резисторів виникають за рахунок проходження в них струму. У змінних резисторах є так звані «механічні» шуми, що виникають при роботі рухомих контактів.

1.3 Конденсатори

1.3.1 Властивості конденсаторів. Найістотніші обмеження, що накладаються на значення ємності інтегральних конденсаторів, пов'язані з їх розмірами. Загальний вираз для ємності конденсатора з паралельними обкладинками може бути записано як

$$C \approx C_0 S,$$

де C_0 – ємність на одиницю площі, а S – площа однієї з обкладинок.

Значення C_0 зазвичай обмежені досить вузьким діапазоном порядку 100-1000 пФ/мм² залежно від виду діелектричного матеріалу в інтегральній схемі і його пробивної напруги. Таким чином, розмір необхідної площі значно збільшується зі збільшенням необхідного значення ємності. Практичний розмір пластинки обмежується технологічними вимогами, що призводить до обмеження можливого значення ємності, яку можна отримати в монолітних схемах.

Конденсатори в монолітних схемах бувають двох видів: на основі *p-n* переходу і тонкоплівкові.

1.3.2 Тонкоплівкові та конденсатори на основі *p-n* переходу. Тонкоплівкові конденсатори являють собою звичайні плоскі конденсатори в мініатюрному виконанні. Вони складаються з двох провідних шарів, розділених діелектриком. У інтегральних схемах конденсатори можна виготовити одним із двох способів: використовуючи структуру метал–діелектрик–напівпровідник (МДН) або тонкий шар діелектрика між двома металевими шарами.

Структура метал–діелектрик–напівпровідник – найпоширеніший тип тонкоплівкового конденсатора в монолітних схемах. У таких конденсаторах ємність на одиницю площі пов'язана з діелектричною сталою і товщиною шару діелектрика T_x :

$$C_0 = \frac{\varepsilon}{T_x} = \frac{\varepsilon_{\text{вдн}} \varepsilon_0}{T_x},$$

де $\varepsilon_{\text{вдн}}$ – відносна діелектрична стала ізолятора;

ε_0 – діелектрична стала вакууму, що дорівнює $8,65 \cdot 10^{-14}$ Ф/см.

Інша структура тонкоплівкового конденсатора, яка використовує тонкий діелектричний шар між двома металевими шарами, показана на рис. 1.2. Хоча вона фактично вільна від паразитного впливу підкладки, потрібні додаткові етапи маскування й осадження, крім тих, які властиві МДН структурі. Як показано на рис. 1.3, як конденсаторні обкладки використовують алюміній або тантал, а діелектриком слугує Al_2O_3 або Ta_2O_5 . Для конденсаторів великої ємності переважно використовується Ta_2O_5 ,

оскільки його діелектрична стала на порядок вища, ніж у більшості інших діелектриків, що застосовуються для тонкоплівкових конденсаторів.

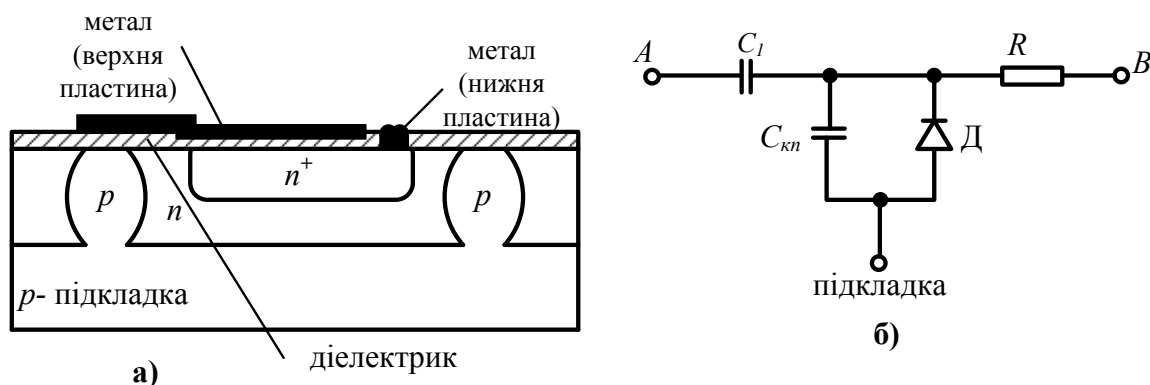


Рисунок 1.2 – Конденсатор типу метал-діелектрик-напівпровідник: а) структурна схема; б) електрична схема заміщення

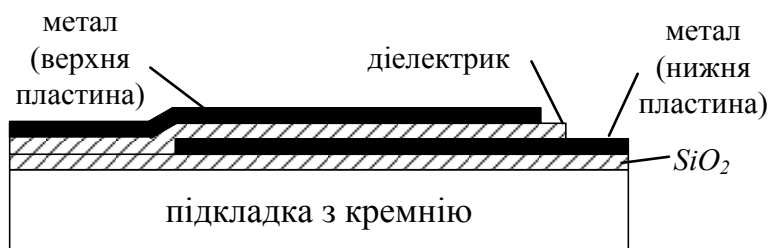


Рисунок 1.3 – Тонкоплівкові конденсатори з двома шарами металу

На відміну від конденсаторів на основі *p-n* переходу в тонкоплівкових конденсаторах параметри не залежать від значення або полярності прикладеної напруги і мають більше значення ємності на одиницю площі при меншому паразитному впливі. Проте існують два основних недоліки, притаманні тонкоплівковим конденсаторам: потрібні додаткові технологічні етапи, окрім звичайних дифузійних циклів; вони виходять з ладу через пробій діелектрика, коли напруга перевищує номінальне значення. Це є незворотне руйнування, тому необхідно вживати додаткових заходів для захисту від перенапруги.

У табл. 1.1 наведено електричні параметри тонкоплівкових конденсаторів в інтегральних схемах. Зауважимо, що перші дві колонки належать до МДН структур, а останні дві відповідають багат шаровій металевій структурі. Максимальний розмір монолітної ємності обмежується технологічними міркуваннями і площею кристала, за сучасної технології він становить приблизно 1 мм².

Таблиця 1.1 – Характеристики тонкоплівкових конденсаторів

Характеристики	Діелектрик			
	SiO ₂	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅
1	2	3	4	5
Ємність, пФ/мм ²	400-600	800-1600	500-800	3000-5500
Відносна діелектрична проникність	2,7-4,2	3,5-9	4-8,5	24-28
Напруга пробою, В	50	50	20-40	20
Абсолютний розкид, %	±20	±20	±20	±20
Розкид відносний, %	±3	±3	±5	±5
Температурний коефіцієнт, 10 ⁻⁵ °С	+15	+4–+10	±300	+200–+500
Q (при 10 МГц)	25-80	20-100	10-100	10-100

1.4 Контрольні запитання

1. Дайте означення резистора.
2. Які види резисторів Ви знаєте?
3. Якими параметрами характеризуються резистори?
4. Які функції виконують резистори в інтегральних схемах?
5. Які види резисторів використовуються у інтегральних схемах?
6. За якою формулою оцінюється спектральна густина шуму?
7. Від якого параметра залежить ефективна напруга шуму?
8. Який параметр накладає найістотніші обмеження на ємність інтегральних конденсаторів?
9. Які переваги тонкоплівкових конденсаторів перед конденсаторами на основі *p-n* переходу?

РОЗДІЛ 2 ДІОДИ

2.1 Властивості діодів

Діод являє собою напівпровідниковий елемент із двома виводами, один з яких називають анодом (A), а інший – катодом (K). Розрізняють дискретні діоди у вигляді окремого елемента, призначеного для монтажу на платі і розміщеного у власному корпусі, й інтегральні діоди, які разом з іншими елементами схеми виготовляються на загальній напівпровідниковій підкладці. У інтегральних діодів є третій вивід, необхідний для з'єднання із загальною підкладкою. Іноді його називають субстратом (S), але він відіграє другорядну роль у функціонуванні самого діода.

Фізично діоди являють собою електронно-дірковий p - n перехід або перехід метал–напівпровідник і називаються, відповідно, діодами з p - n переходом і діодами Шотткі. Зона p збагачена дірками, а зона n – електронами. Умовно-графічне позначення та структура діода показані на рис. 2.1. Зазвичай зони p і n діода з p - n переходом виготовляються з кремнію. Крім цього існують дискретні діоди на основі германію. Їм притаманне низьке пряме падіння напруги, проте вони застаріли. У діодах Шотткі зона p замінена шаром металу, що також призводить до низького прямого падіння напруги, тому вони часто використовуються замість германієвих діодів із p - n переходом.

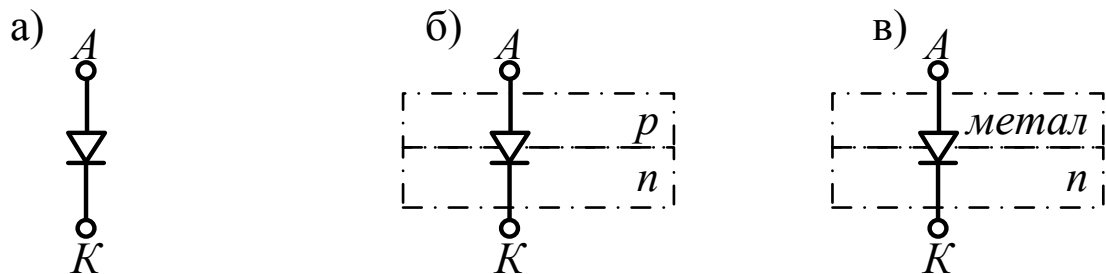


Рисунок 2.1 – Умовне графічне позначення та будова діода:
а – графічне позначення, б – діод із p - n переходом; в – діод Шотткі

На практиці кремнієві діоди з p - n переходом називають просто діодами. За винятком ряду діодів особливого типу, всі вони зображуються на схемах одним і тим же графічним символом. Діоди різного типу розрізняють лише за маркуванням на корпусі і технічними характеристиками.

Режими роботи. Діод може функціонувати у режимі провідності, запирання і пробію, докладний опис яких наведено далі. Діоди, призначені для випрямлення змінного струму, називаються випрямними; вони поперемінно працюють у зоні провідності та запирання. Діоди, сконструйовані для роботи в зоні пробію – стабілітрони (діоди Зенера), застосовують для стабілізації напруги. Ще один важливий клас діодів складають варикапи. Вони функціонують у режимі запирання і завдяки залежності ємності запи-

рного шару (бар'єрної ємності) від прикладеної напруги можуть використовуватися для настроювання коливальних контурів на потрібну частоту. Існує також багато спеціальних діодів.

Поведінку діода найпростіше зобразити за допомогою його вольт-амперної характеристики, що описує залежність струму, який протікає через діод, від прикладеної до нього напруги в разі, коли всі значення постійні або повільно змінюються в часі. Водночас, для розрахунків необхідні рівняння, що точно описують поведінку приладу. Найчастіше достатньо простих співвідношень. Крім того, є модель, що добре відтворює динамічну поведінку діода під впливом синусоїдальних або імпульсних сигналів.

Якщо до діода прикласти напругу $U_D = U_{AK}$ і виміряти струм I_D , вважаючи, що на анод відносно катода підключена відповідна напруга, ми отримаємо характеристики, наведені на рис. 2.2. Звернемо увагу на набагато більший масштаб в зоні додатних напруг. При $U_D > 0$ В діод працює в зоні провідності. Тут струм зростає експоненційно з напругою. У діодів з $p-n$ переходом помітний струм тече при $U_D > 0,4$ В. При $-U_{BR} < U_D < 0$ В діод замкнено, і струм стає дуже малим. Цю ділянку називають зоною запирання.

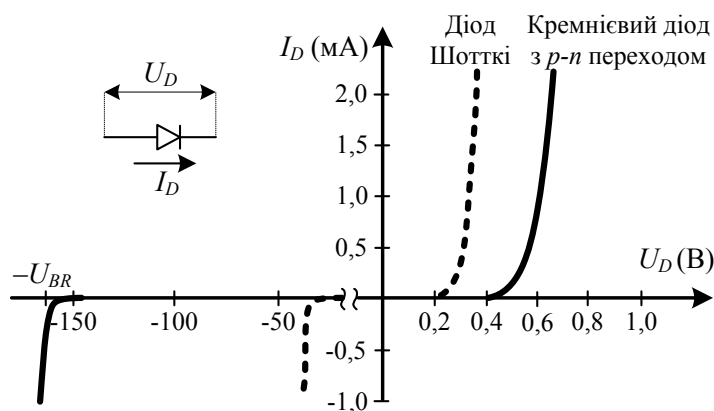


Рисунок 2.2 – Характеристики малопотужних діодів

Напруга пробою U_{BR} залежить від типу елемента і у випрямних діодах становить від -50 до -1000 В. При $U_D < -U_{BR}$ настає пробій діода і виникає зворотний струм. У цій зоні здатні працювати тривалий час тільки стабілітрони і варикапи. Для діодів інших типів наявність зворотного струму при від'ємній напрузі є небажаною. Для германієвих діодів або діодів Шотткі помітний струм в зоні провідності виникає вже при $U_D > 0,2$ В, а напруга пробою U_{BR} становить від -10 до -200 В.

У зоні провідності діода при середніх струмах напруга виявляється майже постійною завдяки крутому підйому характеристики. Ця напруга U_F називається прямою. Для германієвих діодів і діодів Шотткі вона має значення $0,3 \dots 0,4$ В, а у кремнієвих діодів $U_{F,Si} \approx 0,6 \dots 0,7$ В. У силових діодах при струмах в кілька ампер вона буває істотно вищою, оскільки разом із внутрішньою прямою напругою з'являється помітне падіння напруги на

прямому опорі і опорі виводів діода: $U_F = U_{F,I} + I_D R_B$. У граничному випадку $I_D \rightarrow \infty$ діод поводитья, як дуже малий опір $R_B \approx 0,01 \dots 10$ Ом.

Зона запирання у збільшеному масштабі наведена на рис. 2.3. Струм у зворотному напрямку (зворотний струм) $I_R = -I_D$ вельми малий при напрузі запирання $U_R = -U_D$ і з наближенням до напруги пробою спочатку повільно збільшується, а потім різко зростає.

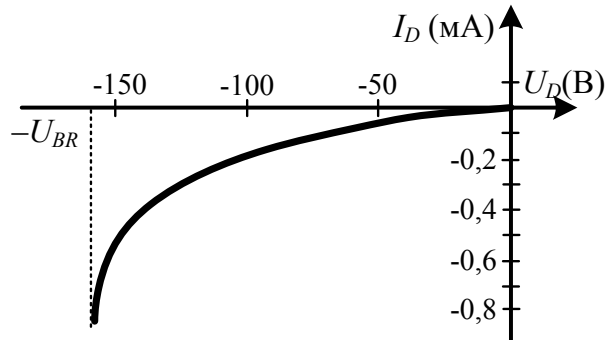


Рисунок 2.3 – Характеристика малопотужного діода на зворотній гілці ВАХ

2.2 Аналітичний опис функціонування діода

Характеристика діода в зоні $U_D > 0$ у напівлогарифмічному масштабі майже лінійна (рис. 2.4).

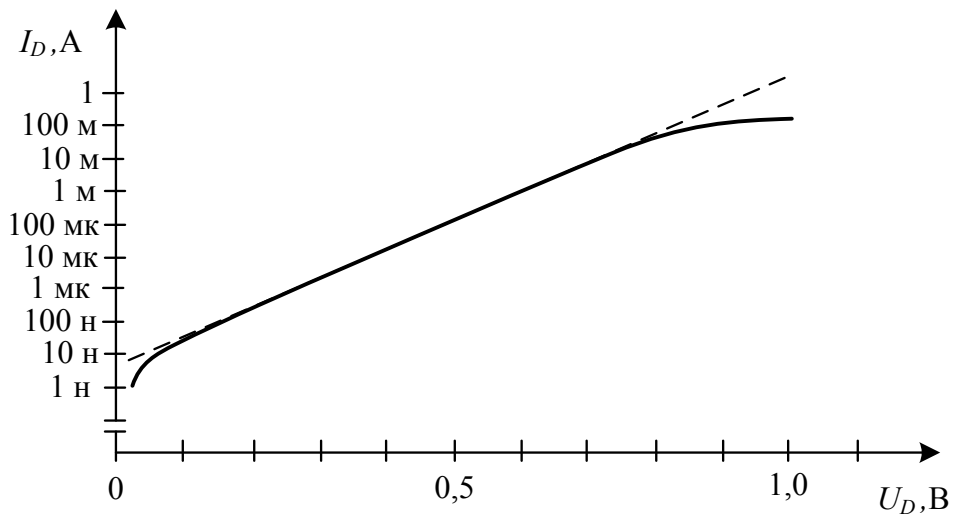


Рисунок 2.4 – Характеристика діода у напівлогарифмічному масштабі при $U_D > 0$

Отже, в силу $\ln I_D \sim U_D$ (пропорційно) між I_D і U_D діє експоненціальна залежність. Виходячи з закономірностей фізики напівпровідників у зоні великого сигналу [1], маємо:

$$I_D(U_D) = I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \text{ для } U_D \geq 0.$$

Для точного опису реальних діодів потрібний поправковий коефіцієнт, який дозволив би привести нахил прямої у відповідність з її поданням у напівлогарифмічному масштабі [1]:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_D}{nU_T}} - 1 \right). \quad (2.1)$$

Тут зворотний струм насичення $I_S \approx 10\text{-}12 \cdot 10^{-6}$ А, коефіцієнт емісії $n \approx 1.2$ і температурна напруга (термопотенціал) $U_T = kT/q \approx 26$ мВ при кімнатній температурі.

Строго кажучи, рівняння (2.1) виконується тільки при $U_D \geq 0$, проте іноді його застосовують і при $U_D < 0$. При $U_D \ll -nU_T$ отримаємо постійний струм $I_D = -I_S$, як правило, значно менший, ніж фактично поточний. Тому справедливо лише твердження про те, що в зоні запирання через діод протікає малий зворотний струм.

У зоні провідності виконується умова $U_D \gg nU_T \approx 26.52$ мВ, отже, можна скористатися

$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}},$$

звідки отримаємо

$$U_D = nU_T \ln \frac{I_D}{I_S} = nU_T \ln 10 \lg \frac{I_D}{I_S} = 60 \dots 120 \text{ мВ} \times \lg \frac{I_D}{I_S}.$$

Таким чином, при десятикратному збільшенні струму напруга зростає на 60...120 мВ. При великих струмах варто враховувати напругу $I_D R_B$ на прямому опорі R_B , яка підсумовується з падінням напруги на p - n переході:

$$U_D = nU_T \ln \frac{I_D}{I_S} + I_D R_B.$$

У цьому випадку виразити струм у вигляді функції $I_D = I_D(U_D)$ не можна. При нескладних обчисленнях діод можна розглядати у вигляді ключа, розімкненого в зоні запирання та замкненого у зоні провідності. Якщо допустити, що напруга на діоді у зоні провідності постійна, а у зоні запирання струм не протікає, діод легко замінити ідеальним ключем, що керується напругою та джерелом прямої напруги U_F , як показано на рис. 2.5,а. Характеристика, що відповідає еквівалентній схемі, показана на рис. 2.5,б. Вона складається з двох прямих:

$$I_D = 0 \text{ для } U_D < U_F \rightarrow \text{ключ розімкнено (а),}$$

$$U_D = U_F \text{ для } I_D > 0 \rightarrow \text{ключ замкнено (б)}.$$

З урахуванням прямого опору R_B маємо:

$$I_D \begin{cases} 0 & U_D < U_F \rightarrow \text{(а)}, \\ \frac{U_D - U_F}{R_B} & U_D \geq U_F \rightarrow \text{(б)}. \end{cases}$$

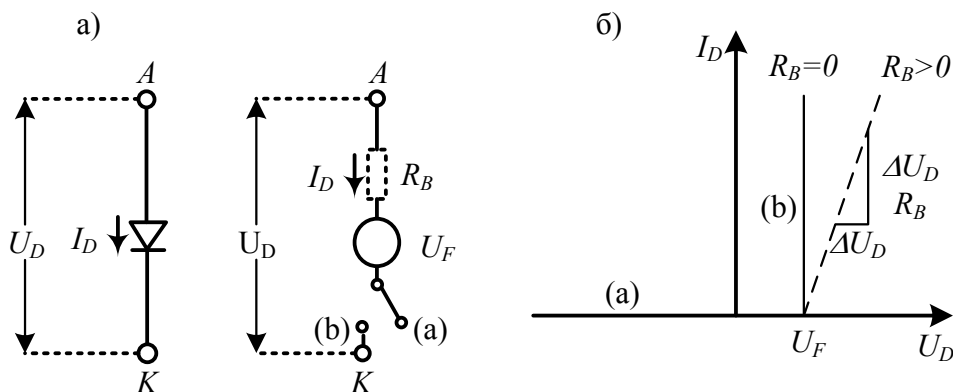


Рисунок 2.5 – Спрощена еквівалентна схема діода з прямим опором (пунктир) та без нього (суцільна лінія)

У кремнієвих діодів з $p-n$ переходом $U_F \approx 0,6$ В, а у діодів Шотткі $U_F \approx 0,3$ В. Відповідна схема і характеристика виділені на рис. 2.5 пунктиром.

У багатьох пристроях діоди працюють позмінно в зонах провідності і запирання, прикладом чому служить випрямлення змінного струму. Процес перемикавання не відповідає статичній характеристиці через накопичення (під час вмикання і вимикання відповідно) заряду паразитної ємності діода. На рис. 2.6 показано схему, за допомогою якої можна знайти характеристику процесу перемикавання при омичному ($L = 0$) і омично-індуктивному ($L > 0$) навантаженні.

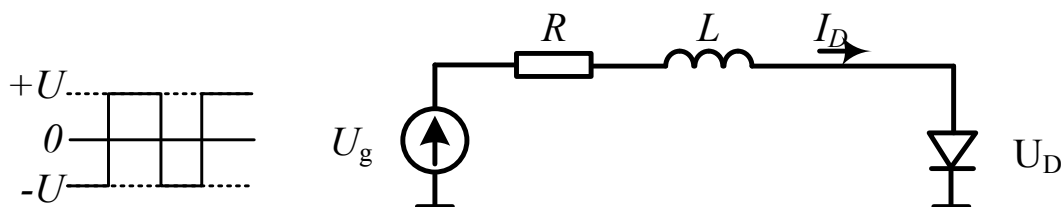


Рисунок 2.6 – Схема для отримання перехідної характеристики

2.3 Режими роботи

Режим, при якому зовнішні сигнали приводять до практично лінійного зміщення положення робочої точки, є режимом малих сигналів. Такі вхідні

сигнали не призводять до змінення параметрів схеми заміщення діода. У такому разі нелінійну характеристику (2.1) припустимо замінити дотичною до неї в робочій точці; при малих сигналах $i_D = I_D - I_{D,A}$, та $u_D = U_D - U_{D,A}$, звідки отримуємо:

$$r_D = \left. \frac{dI_D}{dU_D} \right|_A; U_d = \frac{1}{r_D} u_D.$$

Для диференціального опору діода r_D знаходимо:

$$I_{D,A} \gg I_S,$$

$$r_D = \left. \frac{dI_D}{dU_D} \right|_A = \frac{nU_t}{I_{D,A} + I_S} \approx \frac{nU_T}{I_{D,A}}.$$

Таким чином, еквівалентна схема діода в режимі малих сигналів складається з одного опору r_D ; при великих струмах опор r_D дуже малий, тому доводиться враховувати прямий опір R_B .

Еквівалентна схема діода, показана на рис. 2.7, застосовується лише для розрахунку в режимі малих сигналів на низьких частотах (0.10 кГц) і тому називається низькочастотною еквівалентною схемою для малих сигналів. На вищих частотах слід користуватися високочастотною еквівалентною схемою для малих сигналів.

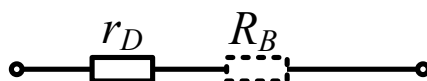


Рисунок 2.7 – Низькочастотна еквівалентна схема для діода в режимі малих сигналів

Граничні параметри і зворотні струми. У специфікаціях діодів вказуються різні граничні параметри, перевищення яких недопустимо. Вони поділяються на граничну напругу, граничні струми і максимальну потужність розсіювання.

Гранична напруга. При нарузі пробою U_{BR} (R – reverse – зворотний) або $U(BR)$ діод у цій зоні пробивається і зворотний струм різко зростає. Оскільки струм помітно збільшується вже з наближенням до напруги пробою, зазвичай приводиться максимальна напруга запирання $U_{r,max}$, до досягнення якої зворотний струм залишається менше деякого граничного значення в діапазоні мікроампер. При імпульсній модуляції або під впливом поодиноких імпульсів припустимі вищі заборонені напруги. Їх називають періодичними максимальними зворотними напругами U_{RRM} і піковою зворотною перенапругою U_{RSM} і вибирають такими, щоб діод не виходив з ладу. За частоту імпульсів береться $f = 50$ Гц. Через протилежність відлікових напрямів вся напруга вважається додатною, причому:

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. Крекрафт Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Крекрафт, С. Джерджли. – 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 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 8,6.
Наклад 300 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.