

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Л.В.Ододворець

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

для студентів спеціальності «Електронні прилади і пристрої» фізико-технічних факультетів університетів

СУМИ ВИД-ВО СУМДУ 2005

ПЕРЕДМОВА

У даному навчальному посібнику, призначеному для студентів спеціальності «Електронні прилади і пристрої» фізико-технічних факультетів університетів, розглядаються питання, пов'язані з основними положеннями, принципами та проблемами мікроелектроніки як галузі науки, яка охоплює проблеми дослідження, конструювання, виготовлення та застосування мікроелектронних виробів, комплексними фізичними, хімічними та технологічними дослідженнями. Використовуючи досягнення фізики твердого тіла, металургії надчистих матеріалів та електронного машинобудування, в твердому тілі формуються складні електронні вузли - інтегральні мікросхеми. Мікро-електроніка на сучасному етапі бурхливо розвивається в зв'язку із широким застосуванням її елементів у сучасній промисловості, автоматичній телебаченні, обчислювальній техніці, зв'язку, системах керування технологічними процесами.

Мікроелектроніка - один з магістральних напрямків у радіоелектроніці, рівень розвитку якого в значній мірі визначає рівень науково-технічного розвитку країни.

Інтерес до мікроелектронних приладів та пристроїв пов'язаний, перш за все, з перспективою збільшення надійності радіоапаратури та її елементів, мініатюризації електрорадіокомпонентів та комплексною мініатюризацією радіоелектронної апаратури.

Підготовка спеціалістів у галузі мікроелектроніки ведеться за такими напрямками: розробка та виробництво інтегральних мікросхем широкого застосування; розробка електронної апаратури з використанням інтегральних мікросхем і мікропроцесорів.

РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Етапи розвитку електроніки

Сучасний науково-технічний прогрес тісно пов'язаний з розвитком електроніки. Успіхи електроніки є результатом створення різноманітних за своїми властивостями електровакуумних та напівпровідникових приладів.

Електроніка - це наука про взаємодію електронів з електромагнітними полями і методи створення електронних приладів та пристроїв, в яких ця взаємодія використовується для перетворення електромагнітної енергії, передачі, обробки і збереження інформації. Електроніка вивчає принципи будови, роботи та галузі використання електронних приладів та пристроїв.

Наведемо класифікацію основних галузей електроніки.

Фізична електроніка - галузь електроніки, що вивчає електронні та іонні процеси у вакуумі, газах та напівпровідниках, на межі поділу вакуум-газ або рідке тіло - тверде тіло.

Технічна електроніка - галузь електроніки, що вивчає будову електронних приладів та процеси їх виготовлення.

Промислова електроніка - галузь електроніки, що вивчає використання електронних приладів у промисловості та апаратурі.

Головними етапами розвитку електроніки є такі: **вакуумна** (електронні лампи, електровакуумні, фотоелектронні прилади, рентгенівські та газорозрядні трубки); **тверdotільна** (напівпровідникові та оптоелектронні прилади, інтегральні мікросхеми, мікропроцесори, мікроЕОМ); **квантова** (лазери, мазери, дальноміри, лінії оптичного зв'язку, радіоастрономія, голографія).

Період розвитку елементної бази електроніки в радіо-електронній апаратурі (РЕА) можна розділити на чотири покоління: 1) дискретна електроніка на електро-вакуумних приладах; 2) дискретна електроніка на напів-провідникових приладах; 3) інтегральна мікроелектроніка на інтегральних мікросхемах; 4) інтегральна мікроелектроніка на функціональних приладах.

У першому поколінні елементної бази електроніки роль активних елементів виконували різноманітні електровакуумні прилади. Як пасивні елементи використовували резистори, конденсатори, котушки індуктивності та інші дискретні радіодеталі.

Друге покоління елементної бази електроніки з'явилося з винаходом транзисторів у 1948 році американськими вченими Бардином і Браттейном. Перші транзистори були точковими, їх р-n-переходи одержували в місці контакту з напівпровідником двох дротів, які заточувалися. Потім у виробництво були введені сплавні транзистори та транзистори з дифузійними переходами, ширина бази яких була зменшена до 0,2 - 0,3 мкм.

Третє покоління елементної бази електроніки - інтегральні мікросхеми - пов'язане із створенням плівкової технології, яка дала можливість у мікрооб'ємах твердого тіла виготовляти велику кількість активних приладів.

Четверте покоління елементної бази електроніки складають функціональні мікросхеми, прилади, вузли. У структурі цих приладів важко виділити елементи, які б були еквівалентами традиційним дискретним компонентам (резисторам, діодам, конденсаторам та ін.). Найважливішим завданням розвитку електроніки та мікроприладобудування є мікромініатюризація дискретних елементів РЕА.

Мікромініатюризація - це напрямок електроніки, який забезпечує реалізацію електронних схем, блоків та апаратури в цілому з мікромініатюрних радіодеталей та

вузлів. Першим етапом розвитку мікромініатюризації є створення мікромодулів, які складаються з мікро-елементів (резисторів, транзисторів, діодів та ін.), з подальшою їх герметизацією. У мікромодулях густина заповнення елементами складає 10 - 20 деталей на 1 см³.

1.2 Положення та принципи мікроелектроніки. Характеристика основних типів інтегральних мікросхем

Мікроелектроніка - галузь науки, яка охоплює проблеми дослідження, конструювання, виготовлення та використання мікроелектронних виробів, причому під мікроелектронним виробом розуміють електронний пристрій з високим ступенем інтеграції. Класифікація виробів мікроелектроніки наведена на рисунку 1.1.

Бурхливий розвиток радіоелектроніки, ускладнення радіоелектронної апаратури привели до необхідності використання дуже великої кількості елементів для виготовлення апаратури. З'явилися інтегральні мікросхеми (ІМС) - мікроелектронні вироби, які виконують функцію перетворення та обробки сигналів і мають високу густину упаковки електрично з'єднаних елементів та кристалів. Інтегральні мікросхеми є предметом вивчення мікроелектроніки, вони включають елементи та компоненти.

Елементом інтегральної мікросхеми називається частина ІМС, яка реалізує функцію простого електрорадіоелемента (наприклад, діода, транзистора, резистора, конденсатора). Ця частина виконується нероздільно від кристала ІМС або її підкладки. Елемент не може бути відділеним від ІМС як самостійний виріб, тому його не можна випробувувати, упаковувати та експлуатувати.

ВИРОБИ МІКРОЕЛЕКТРОНІ КИ

ІНТЕГРАЛЬ НІ МІКРОСХЕ МИ	ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА МІКРОСХЕМИ	МІКРО- КОМПОНЕНТИ
-----------------------------------	---	----------------------

Напів- провідникові	Теплові	Багатошар ові печатні плати
Плівкові	Оптоелектронні	Гнучкі кабелі
Гібридні	П'єзоелектричні	Мікро- рознімання
Сумісні	Електрохімічні	Індикатори
ВІС	Механічні	Мікро- перемикачі
НВЧ-ІМС	На ефекті Ганна	Елементи конструкцій
Мікропроце сори	Іонні	
П'єзокерамі чні	Акустичні	

Рисунок 1.1 - Класифікація виробів мікроелектроніки

Компонентом інтегральної мікросхеми називається частина ІМС, яка реалізує функції електрорадіо-елемента. Ця частина перед монтажем була самостійним виробом (комплектуючим виробом). Компонент може бути відділеним від ІМС.

На сучасному етапі розвитку мікроелектроніки використовують два основних методи створення інтегральних мікросхем: метод локальної дії на мікроділянки напівпровідникового кристала (твердого тіла) та придання йому властивостей, які відповідають функціям мікроелементів та їх з'єднань (напівпровідникові ІМС); метод утворення схем пошаровим нанесенням плівок різних матеріалів на підкладку з одночасним формуванням з них мікроелементів та їх з'єднань. Комбінування цих методів, які доповнюють один одного, призвело до розробки схем нового типу - гібридних інтегральних мікросхем, в яких використовуються мікромініатюрні дискретні активні елементи (транзистори, діоди, зборки). Сучасні напрями розвитку мікроелектроніки наведені на рисунку 1.2.

Перевагами ІМС є: малі розміри, маса та споживана потужність, високі надійність та швидкодія. Основним їх недоліком є мала потужність.

Для класифікації інтегральних мікросхем можна використовувати різні критерії: ступінь інтеграції, фізичний принцип роботи активних елементів, виконуваних функцій, швидкодію, споживану потужність, застосовність в апаратурі й ін.

За ступенем інтеграції інтегральні мікросхеми поділяють на типи: прості (не більш 10 елементів); середні (від 10 до 100 елементів); великі (ВІС) (від 100 до 1000 елементів); надвеликі (НВІС) - більш 1000 елементів.

За характером функцій, які вони виконують: цифрові (тригери, шифратори, компаратори); аналогові (підсилювачі, генератори сигналів).

Але найбільш поширеною є класифікація *за конструктивно-технологічними ознаками*, оскільки при цьому в назві мікросхеми міститься загальна інформація про її конструкцію і технологію виготовлення.

Напівпровідниковою інтегральною мікросхемою (НІМС) називається ІМС, усі елементи і міжелементні з'єднання якої виконані в об'ємі або на поверхні напівпровідника. Напівпровідникова інтегральна

мікросхема найчастіше являє собою кристал кремнію, в поверхневому шарі якого за допомогою методів напівпровідникової технології сформовані області, які еквівалентні елементам електричної схеми, та з'єднання між ними.

МІКРО-ЕЛЕКТРОНІКА	
Плівкові мікросхеми	Оптоелектроніка
Напівпровідникові мікросхеми	Магнетоелектроніка
Гібридні мікросхеми	Акустоелектроніка
Мікропроцесори	Хемотроніка
МікроЕОМ	Кріоелектроніка
Функціональна мікроелектроніка	Біоелектроніка
Квантова мікроелектроніка	Діелектрична електроніка

Рисунок 1.2 - Основні напрями розвитку мікроелектроніки

Плівковою інтегральною мікросхемою (ПІМС) називається ІМС, усі елементи і міжелементні з'єднання якої виконані у вигляді плівок . Плівкові ІС мають підкладку (плату) з діелектрика (скло, кераміка й ін.). Підкладки являють собою діелектричні пластинки товщиною 0,5-1,0 мм, ретельно відшліфовані і відполіровані. При виготовленні плівкових резисторів на підкладку наносяться резистивні плівки. Якщо опір резистора не повинен бути дуже великим, то плівка виготовляється із сплаву високого опору, наприклад, ніхрому. А для резисторів високого опору застосовується суміш металу з керамікою, що одержала назву кермет. На кінцях резистивної плівки виготовляються виводи у вигляді металевих плівок, що разом з тим є лініями, що з'єднують резистор з іншими елементами. Опір плівкового резистора залежить від геометричних розмірів плівки (довжини, ширини, товщини) та матеріалу:

$$R = (\rho \cdot l) / (a \cdot d),$$

де ρ - питомий опір матеріалу плівки; l - її довжина; d - товщина; a - ширина.

Тонкоплівкові резистори за точністю та стабільністю кращі, ніж товстоплівкові, але виробництво їх складніше і дорожче. У тонкоплівкових резисторів питомий опір може бути від 10 до 300 Ом/□ і номінали - від 10 до 10^6 Ом. Температурна стабільність таких резисторів за значенням термічного коефіцієнта опору (ТКО) приблизно $0,25 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Протягом тривалого часу експлуатації опір цих резисторів змінюється мало. Товстоплівкові резистори мають питомий опір від 5 Ом до 1 МОм на квадрат, номінали - від 0,5 до $5 \cdot 10^8$ Ом. ТКО таких резисторів $\beta \sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, однак стабільність у часі таких резисторів гірше, ніж у тонкоплівкових.

Плівкові конденсатори виготовляють з двома обкладинками. Одна - наноситься на підкладку, потім на неї наноситься діелектрична плівка, а зверху розміщується друга.

Плівкові котушки виготовляють у вигляді плоских спіралей, найчастіше прямокутної форми.

Гібридною інтегральною мікросхемою (ГІМС) називається ІМС, у якої пасивні елементи плівкові, а активні націпні. Начіпні елементи - це мініатюрні, найчастіше безкорпусні діоди і транзистори, що являють собою самостійні елементи, які приклеюються (навішуються) у відповідних місцях до підкладки і з'єднуються тонкими провідниками з плівковими елементами схеми. Гібридні ІМС застосовуються як частини підсилювальних каскадів.

У великих інтегральних схемах застосовуються багато-шарові структури з декількома підкладками, які розміщені паралельно одна одній у кілька поверхів. Така система з'єднання елементів називається багаторівневим або багат шаровим розведенням.

Усі інтегральні мікросхеми піддають герметизації для їх захисту від зовнішніх впливів. За конструктивно-технологічними ознаками герметизації розрізняють корпусні (вакуумна герметизація) та безкорпусні (покриття епоксидним чи іншими лаками) ІМС.

За ознакою використання в апаратурі - вироби широкого й спеціального застосування (на замовлення споживача).

1.3 Історія розвитку мікроелектроніки

Фундамент електроніки був закладений працями фізиків 18 - 19-го століть. Перші у світі дослідження електричних розрядів у повітрі здійснили в 18-му столітті в Росії - Рихман, в Америці - Франклін. Важливу подією

стало відкриття в 1802 році електричної дуги. У 1873 році американський винахідник Едіссон винайшов лампу накалювання. У 1887 р. німецький фізик Герц відкрив явище фотоелектру, що стало початком розвитку фотоелектроніки. Пояснення фотоелектру було дане лише в 1905 р. на основі квантової теорії Ейнштейна. У 1901 р. англієць Річардсон провів детальне дослідження термоелектронної емісії.

Використання електронних приладів у радіотехніці почалося з того, що в 1904 р. англійський вчений Флемінг застосував двоелектродну лампу для випрямлення високочастотних коливань у радіоприймачі. У 1907 році американський інженер Форест створив перший триод. У тому ж 1907 році професор Петербурзького технологічного інституту Розинг запропонував застосувати електронно-променеву трубку для приймання зображень, а в подальшому експериментально підтвердив свої ідеї. У 1913 році німецький інженер Мейснер вперше застосував триод для генерації електричних коливань. У 1922 році російський винахідник Лосєв відкрив можливість генерації і посилення електричних коливань за допомогою напівпровідникового детектора. 1930 рік - американський вчений Хелл запропонував схему пентода, російський учений Кубецький винайшов фотоелектронні перемножувачі. Перші пропозиції щодо передавальних телевізійних трубок зробили незалежно один від одного Константинов і Катаєв у 1931 році. 1939 рік - росіянами Арсенєвим та Хейлем побудовані перші генератори НВЧ. Протягом 30-х років відбувався інтенсивний розвиток напівпровідникової електроніки. Особливо великий внесок у розвиток цієї галузі науки внесла група вчених під керівництвом академіка Йоффе. У 1948 р. були створені транзистори (американські інженери Бардін, Шоклі). У 1958 - 1960 роках під керівництвом академіка Тучкевича створені і введені у

виробництво могутні напівпровідникові діоди і тиристори. Окремі американські підприємства починають випуск простих напівпровідникових мікросхем з кількістю елементів до десяти.

Можна виділити шість періодів розвитку інтегральних мікросхем. **Перший період** припадає на початок 60-х років, він характеризується низьким ступенем інтеграції, кількість елементів ІМС досягає 100, мінімальний розмір елемента - 100 мкм. **Другий період** - кінець 60 - початок 70-х років, кількість елементів ІМС від 100 до 1000, мінімальний розмір елемента - 100 - 3 мкм. **Третій період** розвитку ІМС - друга половина 70-х років - характеризується швидкими темпами виробництва мікросхем, кількість елементів від 1000 до 10000, мінімальний розмір елемента - 1 мкм. **Четвертий період** припадає на початок 80-х років, він характеризується розробленням надвеликих ІМС, мінімальний розмір елемента - 0,1 мкм. **П'ятий період** розвитку ІМС - 80 - 90-ті роки. Широко використовуються мікропроцесори на базі великих та надвеликих ІМС. Сучасний **шостий період** розвитку ІМС характеризується розвитком та застосуванням приладів функціональної електроніки.

1.4 Фактори, які обумовлюють розвиток мікроелектроніки

Основними факторами, що обумовлюють розвиток мікроелектроніки, є розроблення надчистих матеріалів, досконалої технології, підготовка висококваліфікованих кадрів.

Для виготовлення активних та пасивних елементів мікросхем широко застосовуються напівпровідникові матеріали, резистивні та провідні метали і сплави, діелектричні з'єднання, фоторезисти, дифузанти. На даний час номенклатура матеріалів, які використо-вуються в

твердотільній електроніці, перевищує 500 найменувань. До них належать речовини високої чистоти, чисті метали та сплави із спеціальними електрофізичними властивостями, дифузанти, різноманітні напівпровідникові з'єднання у вигляді порошків і монокристалів, монокристалічні платини з кремнію, арсеніду і фосфіду галію, фосфіду індію, сапфір, гранат, різні допоміжні матеріали - технологічні гази, фоторезисти, абразивні порошки та ін. Найважливішими серед матеріалів мікроелектроніки є такі речовини, як Si, Ge, Au, Al, B (як акцепторна домішка), P (як донорна домішка). У деяких мікросхемах використовуються Ni, Cr, Ag. Для виготовлення резисторів застосовують півки Cr, Ni-Cr, Ta, для виготовлення конденсаторів - моноокисли Si, Ge, окисли Ta та півки органічного походження, провідників та контактних площадок - Cu, Al, Au, Ni та інші матеріали.

При виготовленні інтегральних мікросхем застосовується велика кількість різноманітних фізико-технологічних процесів. Їх підрозділяють на три основних класи: процеси нанесення речовини у вигляді шарів та плівок на поверхню твердої фази - підкладки; процеси видалення речовини з поверхні твердої фази - підкладки; процеси перерозподілу атомів (іонів) домішок між зовнішнім середовищем та твердою фазою або в об'ємі твердої фази - підкладки.

У перших двох класах процесів змінюється геометрія підкладки, у третьому класі - склад, властивості та структура внутрішніх областей без суттєвої зміни геометричних розмірів.

Технологія виробництва інтегральних мікросхем постійно удосконалюється на основі розроблення нових фізико-технологічних процесів.

1.5 Класифікація та система умовних позначень ІМС

З усіх виробів мікроелектроніки найбільшого поширення одержали інтегральні мікросхеми. Саме вони характеризують сучасний рівень розвитку мікроелектроніки. Техніка виготовлення інтегральних мікросхем ґрунтується на узагальненні як раніше використовуваних у напівпровідниковому виробництві і при одержанні плівкових покриттів групових технологічних прийомів, так і нових технологічних процесів. Це і визначило два головних напрямки у створенні інтегральних мікросхем: напівпровідниковий і плівковий. Однак удосконалювання напівпровідникової і плівкової технології, а також можливість їхнього комбінування дозволили виділити цілий ряд нових самостійних напрямків, за якими можна класифікувати інтегральні мікросхеми (напівпровідникові, плівкові, гібридні і т.д.).

Важливою конструктивною ознакою інтегральної мікросхеми є тип підкладки. За цією ознакою усі відомі інтегральні мікросхеми можна розділити на два класи: мікросхеми з активною підкладкою, мікросхеми з пасивною підкладкою. До першого класу відносять мікросхеми, в яких усі елементи або їх частина виконана усередині самої підкладки - пластини з напів-провідникового матеріалу, а до другого - мікросхеми, елементи яких розміщені на поверхні підкладки, вико-наної з діелектричного матеріалу. Тип підкладки визначається технологією виготовлення інтегральної мікросхеми. Для напівпровідникових ІМС використо-вують активні і пасивні підкладки, для плівкових і гібридних ІМС, як правило, пасивні, для ВІС - активні і пасивні, для НВЧ- і п'єзокерамічних мікросхем - пасивні підкладки.

На рисунку 1.3 наведена класифікація інтегральних мікросхем за конструктивно-технологічними ознаками .

Для інтегральних мікросхем будь-якого типу основними і найбільш складними елементами є транзистори, що за фізичним принципом поділяються на біполярні й уніполярні. У напівпровідникових інтегральних мікросхемах застосовують біполярні і МДП-транзистори,

виготовлені за планарною технологією. У гібридних ІМС - безкорпусні дискретні біполярні і МДП- транзис-тори, виготовлені на основі кремнію за планарно-епітаксialною технологією, діоди, безкорпусні мікросхеми (чіпи).



Рисунок 1.3 - Загальна класифікація інтегральних мікросхем

Інтегральні мікросхеми стали основою елементної бази для усіх видів електронної апаратури. Для конструювання різної апаратури (цифрової, аналогової і аналогово-цифрової) необхідні не окремі мікросхеми, а функціонально повні системи (серії) мікросхем. Тому елементну базу мікроелектронної апаратури складають серії інтегральних мікросхем - сукупність мікросхем, що виконують різноманітні функції, що мають єдину конструктивно-технологічну основу і призначені для спільного застосування в апаратурі (рис. 1.4).

Під **типономіналом** інтегральної мікросхеми розуміють ІМС, яка має конкретне функціональне призначення і своє умовне позначення, під **типом** інтегральної мікросхеми - сукупність типоміналів

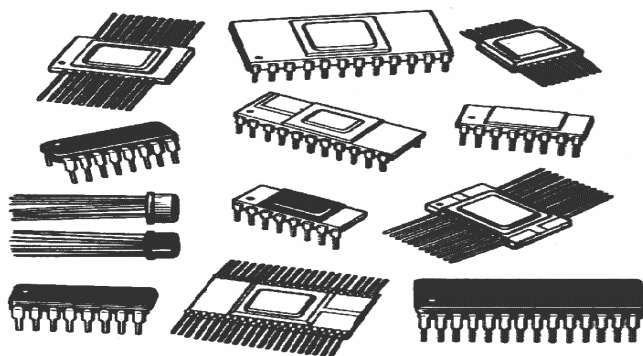


Рисунок 1.4 - Загальний вигляд різних типів інтегральних мікросхем

ІМС, що мають конкретне функціональне призначення і своє умовне позначення. Склад серії визначається в основному функціональною повнотою окремих мікросхем, зручністю побудови складних пристроїв і систем та типом стандартного корпусу. У

залежності від функціонального призначення й сфер застосування серії можуть містити від трьох-чотирьох до декількох десятків різних типів мікросхем. З часом склад перспективних серій розширюється.

Усі інтегральні мікросхеми, що випускаються відповідно до прийнятої системи умовних позначень, за конструктивно-технологічним виконанням поділяються на три групи: напівпровідникові, гібридні та інші. До останньої групи відносять плівкові ІМС, що у даний час випускаються в обмеженій кількості, а також вакуумні, керамічні й ін. Цим групам у системі умовних позначень відповідають такі цифри: 1, 5, 7 - ІМС напівпровідникові (7- безкорпусні НІМС); 2, 4, 6, 8 - ІМС гібридні;

3 - інші ІМС.

За характером виконуваних функцій у радіоелектронній апаратурі ІМС підрозділяються (таблиця 1) на підгрупи (генератори, підсилювачі, модулятори, тригери та ін.) і види (перетворювачі частоти, фази, напруги).

Таблиця 1.1 - Класифікація інтегральних мікросхем за функціональними ознаками

Підгрупа	Вид	Позначення типономіналу
Генератори	Гармонічних сигналів	ГС
	Прямокутних сигналів	ГГ
	Шуму	ГМ
	Інші	ГП
Детектори	Амплітудні	ДА
	Імпульсні	ДИ
	Частотні	ДС
	Фазові	ДФ
	Інші	ДП
Комутатори та ключі	Струму	КТ
	Напруги	КН
	Інші	КП

Продовження таблиці 1.1

Підгрупа	Вид	Позначення типономіналу
Логічні елементи	I - НІ АБО-НІ І АБО НІ І-АБО	ЛА ЛЕ ЛИ ЛЛ ЛН ЛС
Багатофункціональні схеми	Аналогові Цифрові Комбіновані Інші	ХА ХЛ ХК ХП
Модулятори	Амплітудні Частотні Фазові Імпульсні Інші	МА МС МФ МИ МП
Набори елементів	Діодів Транзисторів Резисторів Конденсаторів Комбіновані Інші	НД НТ НР НЕ НК НП
Перетворювачі	Частоти Фази Напруги Потужності Інші	ПС ПФ ПН ПМ ПП
Схеми вторинних джерел електро- живлення	Випрямлячі Перетворювачі Стабілізатори напруги Стабілізатори струму	ЕВ ЕМ ЕН ЕТ

Продовження таблиці 1.1

Підгрупа	Вид	Позначення типономіналу
Тригери	Типу JK Типу RS Типу D Типу T Динамічні Шмідта Комбіновані Інші	ТВ ТР ТМ ТТ ТД ТЛ ТК ТП
Підсилювачі	Високої частоти Проміжної частоти Низької частоти Імпульсних сигналів Диференційні Інші	УВ УР УН УИ УД УП
Фільтри	Верхніх частот Нижніх частот Смугові Інші	ФВ ФН ФЕ ФП
Елементи арифметичних та дискретних пристроїв	Регістри Суматори Лічильники Шифратори Дешифратори Комбіновані Інші	ІР ІМ ІЕ ІВ ІД ІК ІП

За прийнятою системою позначення ІМС складається з чотирьох елементів. Перший елемент - цифра, що відповідає конструктивно-технологічній групі. Другий - дві-три цифри, привласнені даної серії ІМС як порядковий номер розробки. Третій елемент - дві букви, що відповідають підгрупі та виду ІМС. Четвертий елемент - порядковий номер розробки ІМС у даній серії, який складається з однієї або декількох цифр.

РОЗДІЛ 2 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

2.1 Загальна характеристика та класифікація напівпровідників

Напівпровідники - широкий клас речовин, які характеризуються значеннями питомої електропровідності σ , проміжними між питомою електропровідністю металів $\sigma \sim 10^8$ - 10^6 Ом⁻¹ м⁻¹ та діелектриків $\sigma \sim 10^{-8}$ - 10^{-10} Ом⁻¹ м⁻¹ (σ наведена при кімнатній температурі).

Характерна особливість напівпровідників - зростання електропровідності при зростанні температури, причому в широкому інтервалі температур це зростання відбувається експоненціально:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right), \quad (2.1)$$

де σ_0 - провідність при температурі $T \rightarrow \infty$, E_A - енергія активації електропровідності; k - постійна Больцмана. Формула (2.1) означає, що електрони в напівпровідниках зв'язані з атомами енергією зв'язку порядку E_A . З підвищенням температури тепловий рух починає розривати зв'язки електронів, і їх частина стає вільними носіями заряду. На рисунку 2.1 показана залежність провідності власного напівпровідника від температури. Знаючи α , можна визначити величину E_A - енергію активації електропровідності. Для домішкових напів-провідників температурна залежність електропровідності має більш складний вигляд. Зв'язок електронів може бути розірваним не лише тепловим рухом, а й зовнішніми факторами: світлом, радіоактивним випромінюванням, потоком швидких частинок, сильним електричним полем та ін.

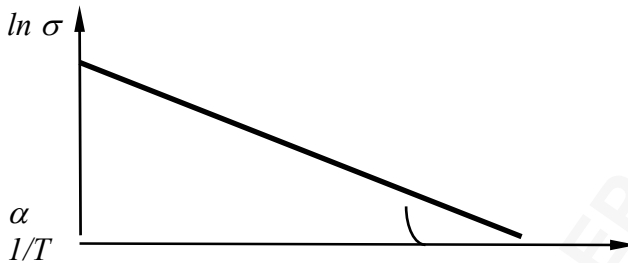


Рисунок 2.1 - Температурна залежність власного напівпровідника

Можливість у широких межах керувати електропровідністю напівпровідників шляхом зміни температури, введенням домішок є основою їх широкого застосування в мікроелектроніці.

Термін «напівпровідники» найчастіше розуміють як сукупність декількох найбільш типових груп речовин, напівпровідникові властивості яких чітко виражені вже при кімнатній температурі ($T = 300\text{K}$). Наведемо приклади таких груп:

I група - елементи IV групи періодичної системи елементів - Si та Ge. Атоми цих елементів мають чотири валентних електрони, утворюють кристалічні решітки типу алмазу з ковалентним зв'язком атомів. Сам алмаз має властивості напівпровідника, однак величина E_A для нього значно більша, ніж у Si та Ge, і тому при температурі 300 K його власна провідність мала.

II група - алмазоподібні напівпровідники (з'єднання елементів III групи (Al, Ga, In) з елементами V групи (P, As, Sb) такі, наприклад, як GaAs, InSb, GaP, InP. Атоми в таких структурах є різнойменно зарядженими. Тому зв'язки в цих кристалах не повністю ковалентні, а й частково іонні. Однак ковалентний зв'язок в них переважає і визначає структуру,

в результаті чого ці кристали за багатьма властивостями є найближчими аналогами Si та Ge.

III група - елементи VI та V груп періодичної системи елементів. Елементи VI групи (Te, Se) були відомі раніше, ніж Si та Ge, причому Se широко використовувався для виготовлення випрямлячів електричного струму та фотоелементів. Елементи V групи (As, Sb, Bi) - напівметали, близькі до напівпровідників, - застосовують як приймачі інфрачервоного випромінювання. Серед сполук елементів VI групи (O, S, Se, Te) з елементами I - V груп досить багато напівпровідників, але більшість з них маловивчена. Найбільш вивченими такими напівпровідниками, які застосовуються, є Cu_2O (купроксні випрямлячі) та Bi_2Te_3 (термоелементи).

IV група - з'єднання елементів VI групи з перехідними металами (Ti, V, Mn, Fe, Ni). У таких напівпровідниках переважає іонний зв'язок. Більшість з них має магнітне упорядкування (магнітні напівпровідники). У деяких з них (V_2O_3 , Fe_3O_4 , NiS) при зміні температури та тиску спостерігається фазовий перехід напівпровідник - метал.

Закони руху носіїв заряду в напівпровідниках описує зонна теорія твердого тіла. У твердому тілі внаслідок взаємодії сусідніх атомів енергетичні рівні розщеплюються. В результаті цього виникають області (зони) дозволених значень енергії, між якими знаходяться заборонені зони.

Якщо кристал є ідеальним, то електрон не може мати в ньому енергію, яка відповідає енергії забороненої зони. Для глибоких рівнів розщеплення є невеликим, оскільки електрони, які знаходяться на них, екрануються зовнішніми оболонками і їх взаємодія з сусідніми атомами не є суттєвою. Зона, яка утворюється цими рівнями, називається валентною. Поряд з глибокими заповненими рівнями, на яких перебувають електрони, в атомі є і більш високі рівні

(пусті). Вони можуть бути заповнені, якщо атом захопить зайвий електрон та перетвориться у від'ємно заряджений іон. У твердому тілі відбувається розщеплення незайнятих рівней та утворення незаповненої зони - *зони провідності*. При температурі абсолютного нуля вона є повністю вільною, на її рінях немає жодного електрона. Між валентною зоною та зоною провідності знаходиться заборонена зона. У відповідності до принципу Паулі максимальна кількість електронів, які можуть знаходитись на одному рівні, обмежена. Це означає, що в багатозарядних атомах усі електрони не можуть накопичуватися на нижньому енергетичному рівні, а заповнюють також верхні рівні. Тепловий рух закидає частину електронів з валентної зони в зону провідності, в валентній зоні при цьому з'являються дірки. Електрони та дірки найчастіше накопичуються поблизу нижнього краю (дна) зони провідності E_c або верхнього краю (потолка) валентної зони E_v на енергетичних відстанях від них $\sim kT$, що набагато менше ширини дозволених зон (рис. 2.2).

У вузьких областях $\sim kT$ складні залежності енергії носіїв від їх квазіімпульсу p від $E(p)$ (закон дисперсії) набувають найбільш простого вигляду. Так, для електронів поблизу E_c закон дисперсії має вигляд (формула 2.2)

$$E = E_c + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{(p_i - p_{0i}^e)^2}{m_i^e}, \quad (2.2)$$

де i - номер осі координат; p_0^e - квазіімпульс, який відповідає E_c ; m_i^e - ефективна маса електронів провідності. Аналогічно для дірок (формула 2.3)

$$E = E_v + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{(p_i - p_{0i}^d)^2}{m_i^d}. \quad (2.3)$$

Ефективні маси електронів та дірок не збігаються з масою вільного електрона m_0 і, як правило, анізотропні, тобто різні для різних i . Їх значення для різних напівпровідників змінюються від сотих часток m_0 до сотень m_0 .

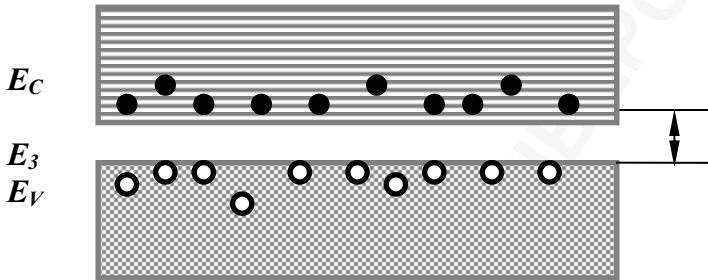


Рисунок 2.2 - Валентна зона (білі кружечки - дірки) та зона провідності (чорні кружечки-електрони провідності): E_3 -ширина забороненої зони; E_C -дно зони провідності; E_V -потолок валентної зони

Ширина забороненої зони також змінюється в широких межах. Наприклад, при $T \rightarrow 0K$ ширина забороненої зони в $PbSe$ $E_3 = 0,165 eV$, в алмазі $E_3 = 5,6 eV$, а сіре олово - безщілиновий напівпровідник має $E_3 = 0$.

2.2 Власна електронна та діркова електропровідність. Рухливість носіїв заряду

У роботі усіх мікроелектронних пристроїв визначальну роль відіграють явища переносу рухливих носіїв заряду або так звані кінетичні явища. Причиною цих явищ є те, що в процесі свого переміщення рухливі носії заряду переносять масу, заряд, енергію та ін. Якщо створюються умови, за яких потоки носіїв заряду стають спрямованими, то виникає ряд електричних ефектів, які покладені в основу

практичного використання напів-провідників (електропровідність, ефект Холла, зміна опору в магнітному полі, термо-ЕРС та ін.).

Електрони та дірки, які переміщуються і створюють електропровідність, називають носіями заряду.

Генерація пар носіїв заряду - це виникнення пари електрон провідності - дірка провідності. Завдяки тому, що носії заряду рухаються хаотично, обов'язково відбувається і процес, зворотний генерації пар носіїв - рекомбінація (електрони провідності займають вільні місця у валентній зоні, об'єднуються з дірками).

Напівпровідник без домішок називають власним напівпровідником. Незважаючи на те, що кількість електронів та дірок у власному напівпровіднику однакова, електронна електропровідність переважає, що пояснюється більшою рухливістю електронів порівняно з рухливістю дірок. Якщо до напівпровідника не прикладати напругу, то електрони та дірки провідності здійснюють хаотичний тепловий рух і ніякого струму немає. Під дією різниці потенціалів в напівпровіднику виникає електричне поле, яке прискорює електрони і дірки та утворює їх поступальний рух - струм провідності. Рух носіїв заряду під дією електричного поля називають дрейфом носіїв, а струм провідності - струмом дрейфу ($i_{др}$). Повний струм провідності складається з електронного та діркового струму:

$$i_{др} = i_{ндр} + i_{рдр} \quad (2.4)$$

Щоб установити, від яких величин залежить струм дрейфу, розглянемо густину струму j :

$$j_{др} = j_{ндр} + j_{рдр} \quad (2.5)$$

Густина струму - це фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, що проходить через одиницю площі за 1 с, тобто

$$j_{\text{пдр}} = n \cdot e \cdot V_n, \quad (2.6)$$

де n - концентрація електронів; e - заряд електрона; V_n - середня швидкість поступального руху електронів під дією поля.

Середня швидкість враховує хаотичний тепловий рух з численними зіткненнями електронів та атомів кристалічної решітки. Від одного зіткнення до іншого електрони прискорюються полем, і тому швидкість V_n , пропорційна напруженості поля E :

$$V_n = \mu_n \cdot E. \quad (2.7)$$

де μ_n - коефіцієнт пропорційності, який називається рухливістю носіїв заряду (в даному випадку електронів).

Рухливість носіїв заряду - це відношення швидкості їх спрямованого руху носіїв заряду в твердому тілі $V_{\text{др}}$ до напруженості електричного поля E , тобто іншими словами це фізична величина, яка чисельно дорівнює середній швидкості поступального руху носіїв заряду під дією поля з одиничною напруженістю. Одиницею вимірювання рухливості є $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Рухливість носіїв заряду в різних напівпровідниках різна (таблиця 2.1), з підвищенням температури вона зменшується, оскільки збільшується кількість зіткнень носіїв з атомами кристалічної решітки. Підставивши вираз (2.7) у формулу (2.6), одержимо

$$j_{\text{пдр}} = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E. \quad (2.8)$$

Таблиця 2.1 - Рухливість носіїв заряду

Напівпровідник	Рухливість електронів при $T = 290 \text{ K}$, $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$	Рухливість дірок при $T = 290 \text{ K}$, $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{c})$
Ge	0,45	0,35
Si	0,13	0,05
GaSb	0,40	0,14
InAs	3,30	0,04
InSb	7,70	0,08

У цьому виразі добуток $n \cdot e \cdot \mu_n$ являє собою питому провідність σ_n , це впливає з закону Ома для густини струму

$$j_{\text{ндр}} = \sigma_n \cdot E. (2.9)$$

Аналогічні співвідношення можуть бути записані і для дірок. Тоді густина повного струму дрейфу у власному напівпровіднику

$$j_{\text{др}} = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E + p \cdot e \cdot \mu_p \cdot E = (\sigma_n + \sigma_p) \cdot E, (2.10)$$

а повна питома провідність

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = n \cdot e \cdot (\mu_n + \mu_p). (2.11)$$

Таким чином, питома провідність залежить від концентрації носіїв та їх рухливості. У напівпровідниках при підвищенні температури завдяки інтенсивній генерації пар носіїв концентрація носіїв, які рухаються, збільшується швидше, ніж зменшується їх рухливість, тому з підвищенням температури провідність напів-провідника зростає. Для порівняння можна відмітити, що в металах концентрація електронів провідності практично не залежить від температури і при підвищенні температури провідність зменшується через зменшення рухливості електронів.

Відмітимо, що завжди рухливість дірок менша за рухливість електронів (таблиця 2.1), а величина діркової провідності менша за величину електронної провідності.

2.3 Контактні явища у мікроелектронних структурах

На основі фізичних властивостей контактів метал - напівпровідник (Me - НП), напівпровідник р-типу - напівпровідник n-типу (НП(р) - НП(н)) засновані принципи дії більшості мікроелектронних елементів. Важливе значення має і пасивна роль контактів, яка полягає в забезпеченні підведення електричного струму. На межі поділу між двома різними за типом електро-провідності напівпровідниками або між напівпровідником та металом виникають потенціальні бар'єри, що є наслідком перерозподілу концентрацій рухомих носіїв заряду між контактуючими матеріалами. Електричні властивості граничного шару залежать як від величини, так і від напрямку зовнішньої напруги, яка прикладається. Якщо граничні шари мають нелінійні вольт-амперні характеристики, то їх називають випрямними переходами. Нелінійні властивості переходів використовують для випрямлення електричного струму, перетворення, підсилення генерації електричних сигналів. На основі випрямних переходів формують біполярні діоди та транзистори, тунельні діоди, діоди Шоттки та інші прилади. Широке застосування випрямні переходи знаходять як ізолюючі елементи в мікроелектронних пристроях. Застосовуються також контакти типу метал-метал (Me-Me), метал - діелектрик (Me-Д), напівпровідник-діелектрик (НП-Д).

Усі електричні контакти підрозділяють на три типи: лінійні, нелінійні та інжекційні.

Оптичні контакти - це контакти, які мають лінійну вольт-амперну характеристику (ВАХ), малий електричний опір, не створюють форму сигналу та шумів.

Нелінійні контакти - це контакти, які мають нелінійну ВАХ, використовуються для випрямлення струму, детектування та генерації сигналів, помноження частоти.

Інжекційні контакти - це контакти, які використовують як джерело надлишкових носіїв заряду для їх проникнення в напівпровідник або діелектрик під дією електричного поля. В інжекційних контактах зовнішнє електричне поле порушує рівновагу потоків носіїв заряду через контакт двох твердих тіл з різними роботами виходу електронів.

Розглянемо різні типи контактів більш детально.

Контакт метал - метал (Me-Me). Цей тип контактів найбільш поширений в мікроелектронних приладах, мають низький електричний опір.

Контакт напівпровідник - напівпровідник (НП-НП). Область на межі двох напівпровідників з різними типами електропровідності називають електронно-дірковим або р-n- переходом. Електронно-дірковий перехід має несиметричну провідність, тобто нелінійний опір. Робота більшості напівпровідникових приладів (діоди, транзистори та ін.) ґрунтується на використанні властивостей одного або декількох р-n- переходів. Коли зовнішня напруга на переході відсутня, носії заряду в кожного напівпровідника здійснюють хаотичний тепловий рух. Відбувається їх дифузія з одного напівпровідника в інший. Таким чином, з напівпровідника n-типу в напівпровідник р-типу дифундують електрони, а в зворотному напрямку з напівпровідника р-типу в напівпровідник n-типу - дірки.

Контакт напівпровідник - діелектрик (НП-Д)

Найбільш поширеними є контакти Si-SiO. Шар оксиду кремнію містить іонізовані атоми донорів. Якщо вони знаходяться близько до поверхні поділу, то впливають на рух носіїв струму напівпровідника та змінюють їх концентрацію в приповерхневому шарі. Наявність збіднених або збагачених шарів впливає на роботу окремих елементів напівпровідникової інтегральної мікросхеми.

Контакт метал-напівпровідник n-типу (Me-НП(n))

Якщо в контакті металу з напівпровідником n-типу (рис. 2.3) робота виходу електронів з металу менша, ніж робота виходу з напівпровідника, то буде переважати вихід електронів з металу в напівпровідник. Тому в шарі напівпровідника навколо межі накопичуються основні носії (електрони), і цей шар стає збагаченим, тобто в ньому збільшується концентрація електронів. Опір

такого шару буде малим при будь-якій полярності напруги, яка прикладається, і такий перехід не буде мати випрямних властивостей. Його називають невикривним (омічним) контактом.

Контакт метал-напівпровідник p-типу (Me-НП(p))

У цьому випадку (рис. 3.4) з напівпровідника в метал переходить більша кількість електронів, ніж в зворотному

напрямку, і в приграничному шарі напівпровідника також формується область, яка збагачена основними носіями (дірками), з малим значенням опору. Цей тип контакту також невикривний. Обидва типи невикривних контактів застосовуються в напівпровідникових приладах никових приладах при розробленні виводів від n- та p-областей. Для цієї мети підбирають відповідні метали.

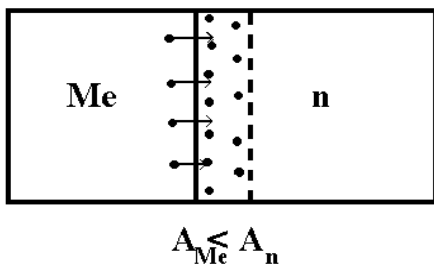


Рисунок 2.3 - Контакт металу з напівпровідником n- типу

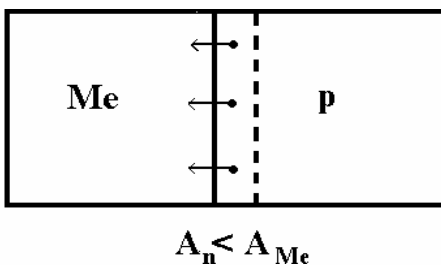


Рисунок 2.4 - Контакт металу з напівпровідником p- типу

Контакт (Me (n) - НП(n)). Якщо в контакті металу з напівпровідником n- типу $A_n < A_{me}$, то електрони будуть переходити головним чином з напівпровідника в метал і в приграничному шарі напівпровідника створюється область, збіднена основними носіями, яка має великий опір. Тут створюється високий потенціальний бар'єр, висота якого буде суттєво змінюватися в залежності від полярності напруги, яка прикладається. Такий перехід має високі випрямні властивості. Подібні переходи у свій час досліджував німецький учений В.Шотткі, і тому потенціальний бар'єр, який виникає в даному випадку,

називають бар'єром Шотткі, а діоди з таким бар'єром - діодами Шотткі. В діодах Шотткі (в металі, куди приходять електрони з напівпровідника) відсутні процеси накопичення зарядів неосновних носіїв, які характерні для електронно-діркових переходів. Тому діоди Шотткі мають значно вищу швидкодію, ніж звичайні діоди, оскільки накопичення зарядів - процес інерційний, тобто для нього потрібен час.

Аналогічними є випрямні властивості контакту металу з напівпровідником р-типу при $A_{Me} < A_n$.

2.4. Поверхневі явища у напівпровідниках

Процеси, що проходять на поверхні напівпровідників, впливають на електричні параметри приладів. Стабільність параметрів напівпровідникових приладів, їхній дрейф у часі і при зміні температури в значній мірі визначаються процесами на поверхні. Стан поверхні і способи її обробки в процесі виготовлення елементів інтегральних мікросхем також впливають на властивості приладів. Причина таких явищ полягає у тому, що в обмеженому кристалі виникають не тільки квантові стани електронів, що рухаються в об'ємі кристала, але і додаткові стани, в яких електрони локалізовані безпо-середньо на самій поверхні кристала. Отже, крім об'єм-них енергетичних рівнів, що утворюють відповідні зони нескінченного кристала, з'являються локальні рівні енергії, розміщені поблизу поверхні. Поверхневий потенціал можна визначити як безрозмірну величину, яка дорівнює відношенню різниці енергій електрона у поверхні та в об'ємі φ_0 до одиниці теплової енергії:

$$\psi_0 = \varphi_0 / (kT). \quad (2.12)$$

Виникнення локальних поверхневих енергетичних рівнів приводить до того, що електрони і дірки можуть

«прилипати» до поверхні, що, у свою чергу, викликає утворення поверхневого електричного заряду. При цьому під поверхнею з'являється однаковий за значенням і протилежний за знаком індукований заряд в об'ємі, тобто з'являються збагачені чи збіднені приповерхневі шари. Виникненням цих шарів і пояснюється вплив поверхні на такі параметри напівпровідникових матеріалів, як провідність, робота виходу, контактна різниця потенціалів та ін. Поверхневі рівні можуть суттєво змінювати кінетику електронних процесів, оскільки вони створюють додаткові центри генерації та рекомбінації рухомих носіїв заряду. Тому усі явища, які пов'язані з кінетикою нерівноважних електронів та дірок, також проявляють залежність від стану поверхні напівпровідникових структур. В технології виготовлення кремнієвих інтегральних мікросхем стан поверхні має дуже важливе значення для нормального функціонування елементів. Захист поверхні елементів кремнієвих ІМС проводять за допомогою вирощених плівок SiO_2 , товщина яких складає 50 - 500 нм. За своєю структурою ця плівка аморфна. Мікродофекти у вигляді кисневих вакансій і впроваджених іонів домішок (переважно позитивно заряджених іонів натрію Na^+), що містяться в оксидній плівці кремнію, обумовлюють наявність достатньо високого позитивного потенціалу, що досягає 10^{-8} - 10^{-7} Кл/см². Наявність позитивного поверхневого заряду сприяє утворенню інверсного шару на кремнії р-типу і збагаченого електронами шару на кремнії n-типу.

Крім відзначених дофектів, реальна поверхня напівпровідника покрита одним чи декількома шарами адсорбованих часток, що приводить до зміни наявних енергетичних станів чи до утворення нових. Адсорбовану частинку можна розглядати як домішковий атом донорного чи акцепторного типу. Адсорбовані частинки можуть бути

зарядженими або нейтральними і обмінюватися з напівпровідником рухомими носіями заряду. Звідси випливає, що процес адсорбції поверхнею різного типу частинок приводить до утворення поблизу поверхні нових енергетичних рівнів.

Підвищені вимоги до чистоти процесів у планарній технології ІМС обумовлені прагненням звести до мінімуму щільність структурних дефектів. Стосовно до процесу окиснювання ці вимоги зводяться до виконання таких умов: окиснювання пластини, реакційна камера з пристосуваннями для завантаження і фіксації пластин, а також окисне середовище не повинні містити або вносити у процес окиснювання неконтрольовані забруднення. Для виконання цієї умови потрібен цілий ряд технологічних операцій.

2.5 Ефект Ганна

Ефект Ганна - це ефект генерації високочастотних коливань електричного струму в напівпровіднику при достатньо великій напрузі, яка прикладається до нього. Ефект був відкритий американським фізиком Дж. Ганном у 1963 році в кристалі арсеніду галію (GaAs) з електронною провідністю. Цей ефект був ретельно досліджений, пояснені фізичні процеси, які відбуваються в напів-провідниках при високій напруженості електричного поля, яке на них діє, та розроблені прилади для генерації коливань НВЧ. Генерація виникає, якщо постійна напруга U , яка прикладається до напівпровідника довжиною l , така, що середнє електричне поле E у зразку дорівнює $E = U/l$, що відповідає падаючій ділянці вольт-амперної характеристики $E_1 - E_2$ (рис. 2.5). Коливання струму мають вигляд періодичної послідовності імпульсів з частотою їх повторення зворотно пропорційною напруженості електричного поля E .

При ефекті Ганна в зразку періодично з'являється, переміщується по ньому та зникає область сильного електричного поля - домен Ганна. Домен виникає вна-

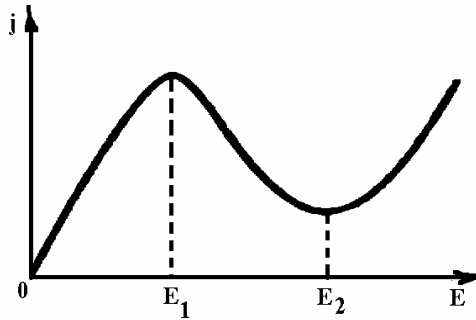


Рисунок 2.5 - Вольт-амперна характеристика:
 E - електричне поле, яке створюється різницею потенціалів; j - густина струму

слідок того, що однорідний розподіл електричного поля є нестійким. Дійсно, якщо в напівпровіднику випадково виникає неоднорідний розподіл концентрації електронів у вигляді дипольного шару, то між зарядженими областями виникає додаткове поле ΔE (рис. 2.6). Якщо

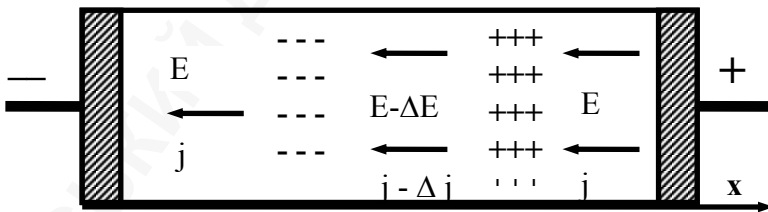


Рисунок 2.6 - Схема розвитку електричного домену область підвищеної концентрації електронів перебуває ближче до катода, то ΔE додається до зовнішнього

електричного поля так, що поле усередині дипольного шару стає більшим, ніж зовні. Якщо при цьому дифузійний опір зразка додатний, тобто струм зростає із зростанням поля, то струм і усередині шару більший, ніж зовні ($dj > 0$). Якщо ж дифузійний опір від'ємний (струм зменшується із зростанням поля), то струм менше там, де E більше, тобто всередині шару, і неоднорідність наростає. Внаслідок цього виникає електричний домен. Поза доменом $E < E_l$, завдяки чому нові домени не виникають. Стійкий стан зразка - це стан з одним доменом. Оскільки домен утворюється електронами провідності, він рухається в напрямку їх дрейфу із швидкістю v , величина якої є близькою до дрейфової швидкості. Домен виникає поблизу катода і, дійшовши до анода, зникає. У міру його зникнення падіння напруги на домені зменшується, а на іншій частині зразка збільшується. Одночасно зростає і струм у зразку. Частота коливань струму $f = v/l$.

У GaAs з електронною провідністю при кімнатній температурі $E_l \sim 3 \cdot 10^5$ В/м, $v \sim 10^5$ м/с і при $l = 50 - 300$ мкм, $f = 0,3 - 2$ ГГц. Розмір домену складає 10 - 20 мкм. Ефект Ганна, крім GaAs, спостерігається в напівпровідниках InP, CdTe, ZnS, InSb, InAs та Ge з дірковою провідністю.

Ефект Ганна використовується для створення генераторів НВЧ із заданою формою сигналу, аналогово-цифрових перетворювачів, приладів оптоелектроніки (модуляторів, приймачів світла) та підсилювачів НВЧ.

РОЗДІЛ 3 НАПІВПРОВІДНИКОВІ ІМС

3.1 Типи конструкцій та структура ІМС

Напівпровідникові інтегральні мікросхеми набули широкого застосування через їх масове використання в обчислювальній техніці. Усі елементи і міжелементні з'єднання виконані в середині та на поверхні напів-

провідника. НІМС виготовляють на основі планарної технології напівпровідникових приладів. Усі елементи напівпровідникових ІМС (транзистори, діоди, резистори й ін.) формують у єдиному технологічному потоці в тонкому поверхневому шарі напівпровідникової пластини (підкладки) діаметром 40 - 150 мм і товщиною 0,2 - 0,4 мм. На одній підкладці діаметром

40 - 75 мм одночасно виготовляють до 1000 мікросхем (рис. 3.1 а), після чого її розрізають алмазним різцем чи іншими способами на прямокутні пластини - окремі кристали мікросхеми. Кристал мікросхеми кріплять до основи корпусу (рис. 3.1 б) і, виконавши необхідні електричні з'єднання із зовнішніми виводами, герметизують.

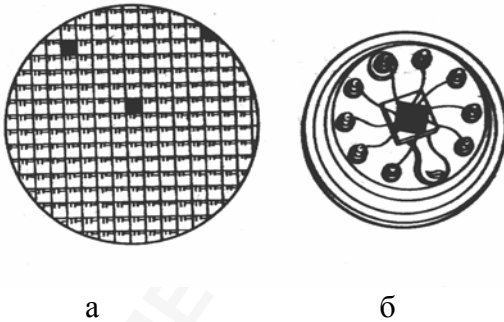


Рисунок 3.1 - Напівпровідникові інтегральні мікросхеми: а - підкладка ІМС; б - з'єднання ІМС із зовнішніми виводами корпусу

Розрізняють **чотири типи НІМС**: планарно-дифузійні (однокристалні) на біполярних структурах; сумісні (з тонкоплівковими пасивними елементами); на МДН-структурах (метал - діелектрик - напівпровідник); багатокристалні.

У *планарно-дифузійних мікросхемах* на біполярних структурах елементи являють собою області з різним типом електропровідності усередині монокристалічної напівпровідникової підкладки (рис. 3.2). Ці елементи ізолювані один від одного оборотно зміщеним р-n-переходом або шаром діелектричного матеріалу, наприклад, окислу кремнію. Цифри ділянок структури (рис. 3.2) відповідають позначенням електричної схеми.

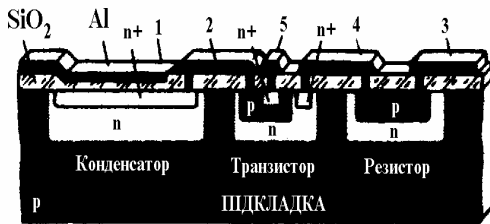
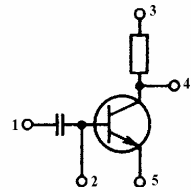


Рисунок 3.2 - Структура та електрична схема планарно-дифузійної НІМС



Сумісні мікросхеми - це сполучення напівпровідникової мікросхеми з тонкоплівковими елементами на підкладці з кремнію. Осадження тонких плівок роблять безпосередньо після виконання усіх дифузійних операцій, за допомогою тонкоплівкової технології створюють резистори і конденсатори. Ці елементи мікросхеми можуть бути виконані за номінальним значенням більш точними у порівнянні з дифузійним методом.

Мікросхеми на МДН-структурах виконують на основі польового транзистора з ізолюваним затвором. В

інтегральних мікросхемах ці транзистори використовують як активні та пасивні елементи, що забезпечує максимальну повторюваність та технологічність при виготовленні мікросхем. Вони мають більш високий ступінь інтеграції порівняно з іншими типами напівпро-відникових мікросхем.

Багатокристалльні мікросхеми складаються з окремих компонентів, які розміщені на загальній підкладці та з'єднані між собою тонкоплівковими провідниками та дротовими виводами (рис.3.3). Для герметизації

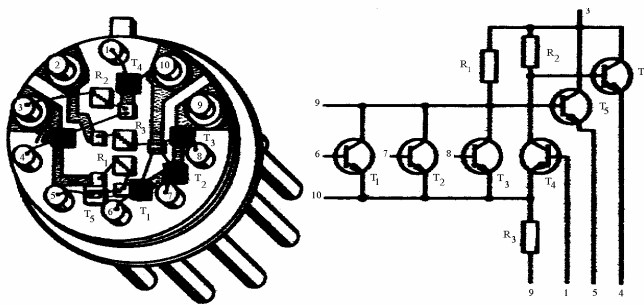


Рисунок 3.3 - Структура та електрична схема багатокристалльної ІМС

загальну підкладку розміщують у корпусі. Виготовлення багатокристалльних ІМС потребує меншої кількості технологічних операцій, оскільки усі компоненти виконуються окремо. Однак ці ІМС в умовах масового виробництва коштують дорожче, оскільки в них важко автоматизувати операції збирання. Багатокристалльні мікросхеми мають кращі робочі характеристики, оскільки вплив паразитних зв'язків у них менший за однокристалльні ІМС.

3.2 Ізоляція елементів у ІМС

Як було зазначено вище, у напівпровідникових інтегральних мікросхемах елементи виконані усередині (у приповерхньому шарі) і на поверхні напівпровідникової підкладки - кристала, що являє собою пластинку кремнію товщиною 200 - 300 мкм. Площа кристала від 1,5 x 1,5 до 6 x 6 мм. У порівнянні з плівковими і гібридними ІС напівпровідникові мають найбільш високе число елементів в одиниці об'єму і найбільшу надійність (найменшу інтенсивність відмов). Недолік напівпровідникових ІС - трохи гірша якість пасивних елементів (резисторів, конденсаторів) і неможливість створення в напівпровіднику котушок індуктивності. Проте НІМС займають провідне місце в мікроелектроніці, тому що саме на їх основі виготовляються великі і надвеликі інтегральні схеми.

Оскільки усі елементи робляться в єдиному напівпровідниковому кристалі, то важливо забезпечити ізоляцію елементів від кристала і один від одного. Застосовується декілька способів ізоляції. Найбільш простою і дешевою є **ізоляція n - p - переходом**. У цьому випадку в кристалі, наприклад із кремнію типу p, методом дифузії робляться області типу n, названі «кишенями» (рис.3.4). У «кишенях» потім формуються необхідні пасивні та

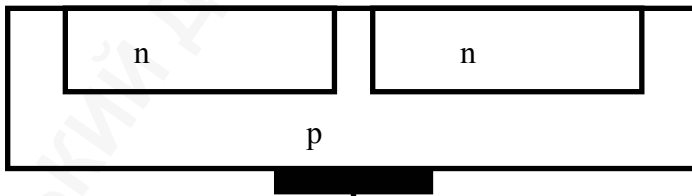


Рисунок 3.4 - Ізоляція елементів НІМС n-p-переходом активні елементи, а n - p - перехід між «кишенями» і кристалом у працюючій інтегральній схемі перебуває під зворотною напругою. Для цього на кристал постійно подається від'ємний потенціал у декілька вольтів.

Кремнієвий n - p - перехід при зворотній напрузі має дуже високий опір (декілька МОм), який і виконує роль ізоляції. Очевидно, що між будь-якими двома елементами опір ізоляції буде дорівнювати подвійному зворотному опору ізолюючого n - p - переходу. Потрібно враховувати, що кожен такий перехід має бар'єрну ємність, і тому між елементами виникає паразитний ємнісний зв'язок через ємності переходів.

У разі *ізоляції діелектричним шаром* (рис. 3.5) методом дифузії формуються «кишені» для подальшого утворення в них потрібних елементів, але між «кишенею» та кристалом Si має місце тонкий діелектричний шар SiO_2 , створення якого значно ускладнює виготовлення мікросхеми. Але ізоляція одержується набагато краща, ніж за допомогою n - p - переходу. Паразитна ємність між «кишенею» та кристалом у цьому випадку набагато менша, оскільки діелектричний шар у декілька разів товщий, ніж ізолюючий шар n - p - переходу.

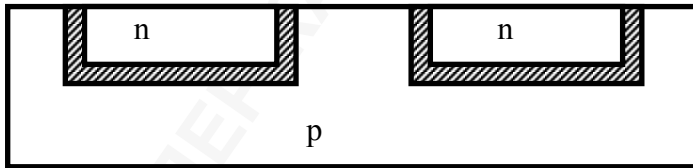


Рисунок 3.5 - Ізоляція елементів НІМС діелектричним шаром

Третій тип ізоляції - *комбінований*. У цьому випадку бокові сторони «кишень» ізолюються діелектричним шаром SiO_2 , а нижня сторона ізолюється від підкладки n - p - переходом під зворотною напругою (рис. 3.6). При такому методі паразитна ємність між елементами зменшується в порівнянні з ізоляцією n - p - переходом та досягається

більша густина розміщення елементів, оскільки відстані між елементами значно зменшуються.

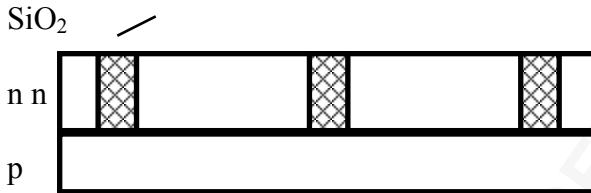


Рисунок 3.6 - Схема комбінованої ізоляції

Одержала поширення *ізоляція типу кремній на сапфірі*. На сапфіровій підкладці, яка є гарним діелектриком, нарощують епітаксціальний шар кремнію (~ 1 мкм). Це стає можливим тому, що сапфір і кремній мають однакову кристалічну решітку. Шар кремнію протравлюють так, що утворюються кремнієві «острівки» (рис.3.7). В цих «острівках» методом дифузії

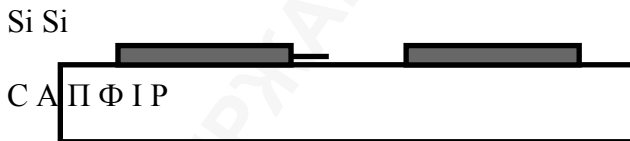


Рисунок 3.7 - Ізоляція типу «кремній на сапфірі»

формується необхідні елементи, які ізолюються один від одного сапфіром, а з боків - повітряним шаром. Недолік цього методу - такі мікросхеми мають рельєфну поверхню, а це заважає виготовленню надійної системи мікроз'єднань елементів.

3.3 Транзистори у НІМС

3.3.1 Біполярні транзистори

Біполярні транзистори (БТ) виготовляють шляхом створення в кристалі методом дифузії областей колектора (К), емітера (Е) і бази (Б) (рис.3.8). Структура транзистора заглиблюється в кристал не більше, ніж на 15 мкм, а його лінійні розміри на поверхні не перевищують декількох десятків мкм.

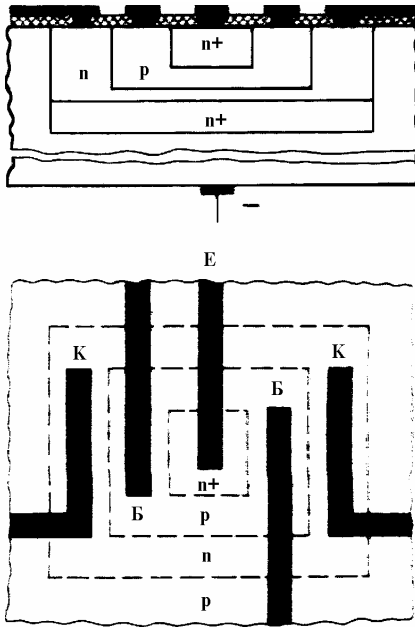


Рисунок 3.8 - Біполярний транзистор типу n-p-n

Як правило, виготовляються транзистори типу n-p-n. Внутрішній шар з підвищеною концентрацією домішок n^+ в колекторі служить для зменшення опору і втрат потужності в області колектора. Але у колекторному переході область колектора повинна мати знижену концентрацію домішок, щоб перехід мав велику товщину. Тоді ємність у нього буде менша, а напруга пробною вище. Область емітера також

часто роблять типу n^+ для зменшення опору і збільшення інжекції. Зверху на транзистор наноситься захисний шар оксиду SiO_2 . Від областей колектора і бази часто роблять по два виводи (рис. 3.8), для того щоб можна було з'єднати даний транзистор із сусідніми елементами без перетинань сполучних ліній. Такі перетинання дуже небажані, тому що вони значно ускладнюють виробництво. Дійсно, у місці перетинання треба на нижню сполучну лінію нанести діелектричну плівку, а поверх її нанести верхню сполучну лінію, тобто треба зробити дві зайві технологічні операції. Крім того, місце перетинання завжди становить небезпеку відносно пробою від випадкових перенапруг.

Важлива проблема при проектуванні і конструюванні інтегральних мікросхем - таке розміщення (топологія) елементів схеми, при якому з'єднання можуть бути зроблені без перетинань, у крайньому разі, з мінімальним числом перетинань. Крім того, важливо, наскільки це можливо, зменшити паразитні зв'язки між елементами. При великій кількості елементів може бути величезне число варіантів їх розміщення і для розгляду усіх таких варіантів для вибору оптимального треба витратити дуже багато часу. Останнім часом цю роботу стали виконувати електронно-обчислювальні машини, що, діючи за визначеними заданими умовами, у короткий час можуть вибрати найвигідніший варіант розміщення елементів.

Типові параметри біполярних транзисторів напівпровідникових ІС такі: коефіцієнт підсилення струму бази 200, гранична частота до 500 МГц, ємність колектора до 0,5 пф, пробивна напруга для колекторного переходу до 50 В, для емітерного до 8 В. Питомий опір n - і p -шарів складає кілька сотень, а n^+ -шарів - не більш 20 Ом/□.

Необхідно приділити увагу тому, що в НІМС завжди мають місце деякі паразитні елементи. Наприклад, поряд із транзистором типу n - p - n (рис. 3.9), який створений в

кристалі типу р, існує паразитний тран-зистор р-п-р, який формується кристалом, областю колектора і областю бази транзистора. А транзистор п-р-п разом з кристалом створює паразитний тиристор п-р-п-р. Завдяки існуванню зворотної напруги на ізолюючому переході паразитні транзистори і тиристор щільно закриті, але при попаданні в них яких-небудь імпульсів перешкод може відбутися небажане спрацьо-вування цих елементів.

У біполярних транзисторах основний струм через емітерний і колекторний переходи проходить верти-кально (якщо сама ІС розміщена горизонтально). Такі транзистори називаються *вертикальними* і виготовляються в основному типу п-р-п. У деяких випадках потрібні транзистори р-п-р. Вони мають таку структуру, що струм проходить через переходи в горизонтальному напрямку (рис. 3.9). Такі транзистори

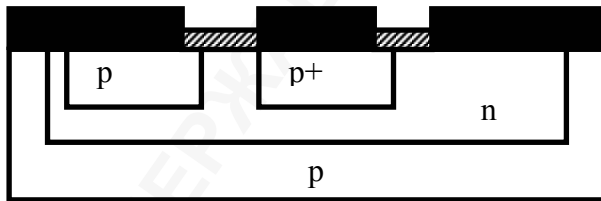


Рисунок 3.9 - Горизонтальний транзистор типу р-п-р

називають *горизонтальними*. У порівнянні з вертикаль-ними їх база буде товщою і тому гранична частота буде нижчою.

3.3.2 Польові транзистори

Польові транзистори (ПТ), які використовують у ІМС, мають структуру метал-діелектрик-напівпровідник (МДН). Оскільки більшість мікросхем виконують на основі

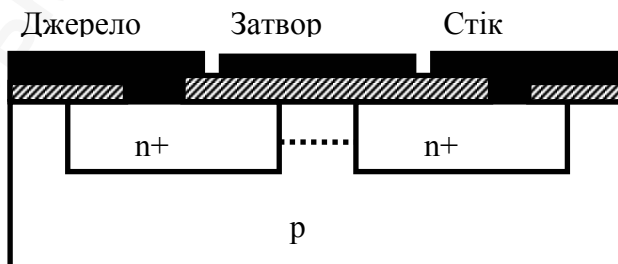
Si, а при їх виготовленні використовують діелектрик SiO₂, то такі транзистори мають структуру метал-оксид-напівпровідник (МОН). За типом каналу МОН-транзистори поділяють на: транзистори з індукованим каналом та з встроєним каналом, а за типом провідності каналу на n-канальні та p-канальні.

Відносно просто виготовляються МОН-транзистори з індукованим каналом. Для них в кристалі р-типу потрібно лише створити методом дифузії області n⁺ джерела та стоку (рис. 3.10 а). На переходах між цими областями та підкладкою підтримується зворотна напруга і, таким чином, здійснюється ізоляція транзисторів від кристала та один від одного. Аналогічна ізоляція каналу від кристала.

Декілька складніше виготовити на підкладці типу р МОН-транзистор з каналом р-типу, оскільки для такого транзистора необхідно спочатку зробити «кишеню» n - типу (рис. 3.10 б).

У деяких інтегральних схемах знаходять застосування пари МОН-транзисторів з каналами n - та p - типів - комплементарні транзистори (КМОН або КМДН). Вони знайшли застосування в цифрових схемах і відрізняються дуже малим споживанням струму та високою швидкодією.

Трапляються також інтегральні схеми, в яких на одному загальному кристалі виготовлені біполярні (або полярні) та МОН-транзистори - планарні транзистори. На рисунку 3.11 а показана структура планарного польового транзистора з n - каналом.



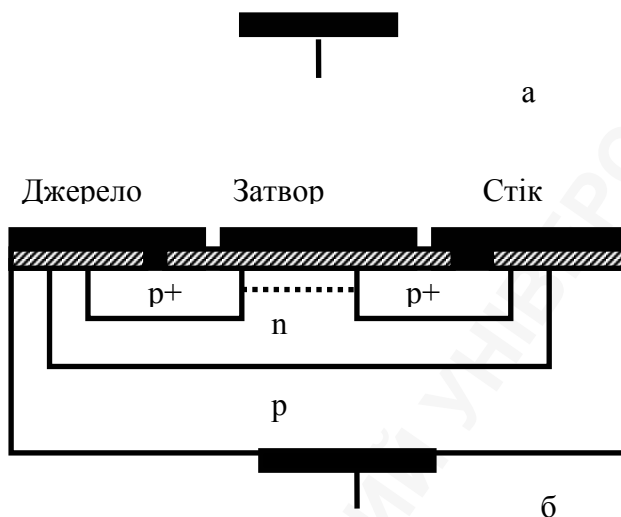
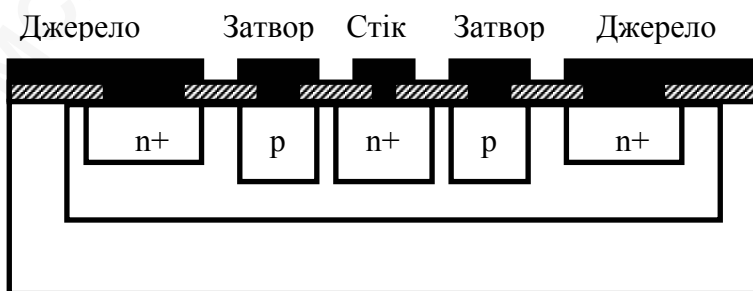


Рисунок 3.10 - МОН - транзистор НІС з індукованим каналом n - типу (а) та p - типу (б)

У «кишені» n-типу створені області (n^+ -типу) стоку та джерела

та область (p-типу) затвору. Стік розміщується у центрі, джерело - навколо нього. Для зменшення початкової товщини каналу іноді усередині роблять схований шар p^+ , але це пов'язано з ускладненням техно-логічних процесів. Другий варіант польового транзистора з каналом p - типу зображено на рисунку 3.11 б.



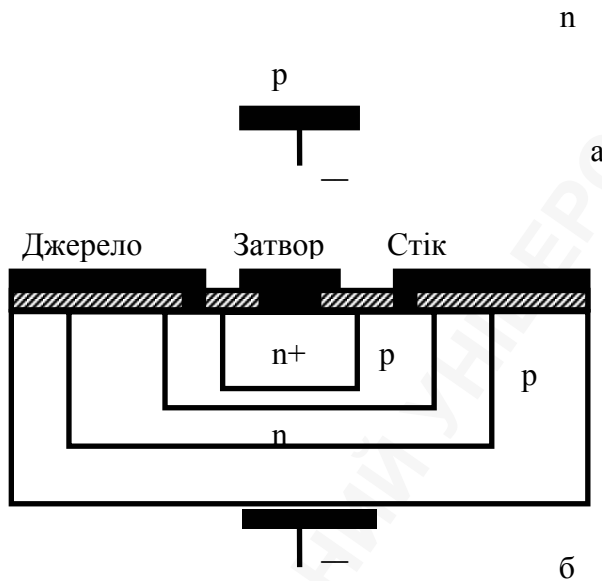


Рисунок 3.11 - Польовий транзистор НІС з каналом n-типу (а) та р-типу (б)

Його структура співпадає із структурою звичайного p - p - n - транзистора. Як канал використовується шар бази.

3.3.3 Багатоемітерні та багатоколекторні транзистори

Крім звичайних транзисторів, у цифрових напівпровідникових інтегральних схемах застосовують також багатоемітерні транзистори. Як приклад показаний чотириемітерний транзистор (рис. 3.12). Такий транзистор можна відчинити подачею імпульсу прямої напруги на кожний з чотирьох емітерних переходів. До кожного емітера підключається своє джерело імпульсу. При цьому важливо, щоб такий імпульс напруги не проникнув у інші джерела вхідних імпульсів, тому що емітерні переходи, які не працюють у цей момент, будуть перебувати під

зворотною напругою. Наприклад, якщо на емітер E_1 поданий імпульс від'ємної напруги, то n-p-перехід цього емітера відчиняється й у транзисторі виникає колекторний струм. Негативний потенціал з E_1 передається на базу типу p, а оскільки емітери E_2 , E_3 і E_4 мають нульовий потенціал, то на їх n- p- переходах виникає зворотна напруга, різко збільшується опір і, таким чином, імпульс, поданий на E_1 , буде потрапляти в ланцюги емітерів E_1 , E_2 , E_4 - у

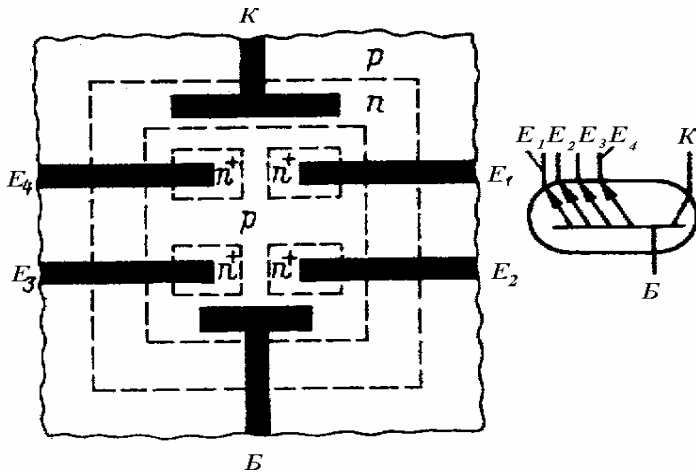


Рисунок 3.12 - Структура та умовне графічне позначення багатоемітерного транзистора

ланцюзі виникає розв'язка. Якби чотири різних джерела імпульсів, що відмикають, були підключені разом до одного емітера, то розв'язки не вийшло б. У цьому випадку для розв'язки в ланцюг кожного джерела вхідного сигналу включають діоди, що значно складніше, ніж застосування одного багатоемітерного транзистора. Варто звернути увагу, що в багатоемітерному транзисторі працюючий емітер разом з базою і сусіднім емітером

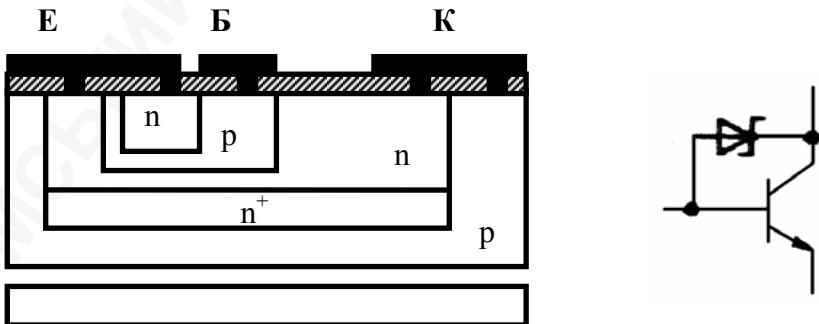
утворює паразитний транзистор. Щоб зменшити вплив останнього, між сусідніми емітерами роблять відстань не менше 10 мкм, тобто у такого паразитного транзистора виходить порівняно товста база.

Подібно до багатоемітерних транзисторів застосовуються багатоколекторні транзистори. Їх структуру можна уявити собі, якщо в схемі на рисунку 3.12 чотири емітери включити як колектори, а колектор змусити працювати як емітер.

3.3.4 Транзистор з бар'єром Шотткі

Транзистор з бар'єром Шотткі - це біполярний транзистор, у якого колекторний перехід шунтований діодом Шотткі (рис. 3.13).

Діод Шотткі має контакт металу з напівпровідником та випрямні властивості. Його перевага - відсутність дифузійної ємності. Робочі частоти діода сягають 15 ГГц. У транзисторі з бар'єром Шотткі алюмінієва металізація забезпечує випрямний контакт з базою типу p, тобто діод Шотткі з колектором типу n. При роботі такого транзистора в режимі ключа значно підвищується швидкодія. Транзистор швидко переходить з відкритого стану в закритий.





а

б

Рисунок 3.13 - Структура (а) та електрична схема (б) транзистора з бар'єром Шоттки

3.4 Діоди у напівпровідникових ІМС

Як діоди у напівпровідникових інтегральних мікросхемах використовуються біполярні транзистори в діодному ввімкненні. Це зручно для виробництва. Можливі п'ять варіантів діодного ввімкнення транзисторів (рис. 3.14). У випадку БК - Е база і



Рисунок 3.14 - Варіанти використання транзисторів у діодному ввімкненні

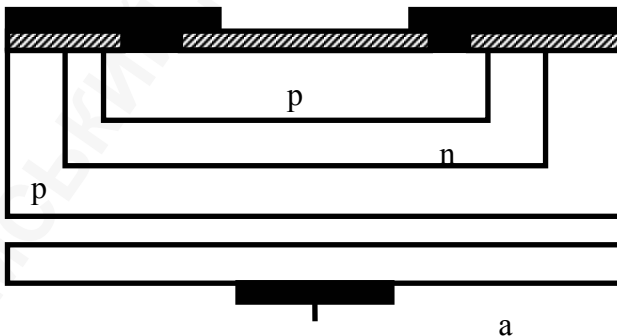
колектор замкнуті накоротко, час переключення з відкритого стану в закритий мінімальний - одиниці наносекунд. У випадку Б-Е використовується тільки емітерний перехід. Час переходу в декілька разів більший. Обидва ці випадки мають мінімальну ємність (~0,1-0,5 пкФ), мінімальний зворотний струм (0,5-1,0 нА) і мінімальну пробивну напругу. У випадку БЕ-К, коли база і емітер замкнуті накоротко, та у випадку Б-К з використанням одного колекторного переходу час переходу з відчиненого стану в зачинений порядку десятків наносекунд, пробивна напруга - 40-50 В, зворотний струм -

15 - 30 нм. Випадок Б-ЕК з паралельним з'єднанням обох переходів має найбільший час переходу (100 нс), максимальний зворотний струм (до 40 нА), трохи більшу ємність і таку ж малу пробивну напругу, як і у перших двох випадках. Найчастіше використовуються випадки БК-Е та Б-Е.

3.5 Напівпровідникові резистори

У НІМС використовуються дифузійні резистори - області усередині кристала з тим або іншим типом провідності (рис. 3.15). Опір дифузійного резистора залежить від довжини, ширини та товщини області, яка виконує роль резистора, питомого опору (концентрації домішок). Резистор типу р (рис. 3.15 а) виготовляється одночасно з базами транзисторів. У цьому випадку питомий опір складає сотні Ом на квадрат і можуть бути одержані номінали до десятків кОм. Для збільшення опору резистор іноді роблять зигзагоподібною конфігурації. Якщо необхідні відносно малі опори (одиниці або десятки Ом), то резистори виготовляють

одночасно з емітерними областями типу n (рис. 3.15 б) транзисторів. Температурний коефіцієнт опору (ТКО) дифузійних напівпровідникових резисторів $\beta \sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.



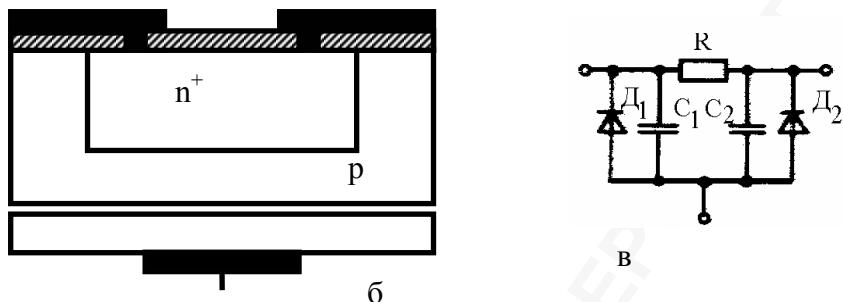


Рисунок 3.15 - Дифузійні резистори напівпровідникових інтегральних схем (а,б) та еквівалентна схема дифузійного резистора

Останнім часом для виготовлення резисторів використовується також метод іонної імплантації, при якому відповідне місце кристала піддається бомбардуванню іонами домішки, які проникають в нього на глибину 0,2 - 0,3 мкм. Питомий опір таких резисторів складає величину до 20 кОм/□.

Слід звернути увагу на паразитну ємність відносно підкладки. Крім того, у резистора типу р (рис. 3.16 а) разом з кристалом формується паразитний n-p-n- транзистор. При проектуванні ІС завжди вибираються такі режими роботи резистора, коли паразитний транзистор є закритим і практично не має шкідливої дії. Паразитна ємність обмежує робочі частоти, на яких опір резистора можна вважати активним. На частотах, вищих деякої граничної, опір резистора стає комплексним. Еквівалентна схема дифузійного резистора із структурою, яка показана на рисунку 3.16 б, зображена на рисунку 3.16 в. В ній враховані паразитні елементи: конденсатори C_1 і C_2 , відповідні ємності між резистором та підкладкою, діоди D_1 і D_2 , які перебувають під зворотною напругою. Діоди

відповідають ізольуючому p-p-переходу. Схема є приблизною, оскільки насправді ємність та опір ізоляції розподілені вздовж резистора.

Канал МОН-структури також використовується як резистор. Такі МОН-резистори виготовляються одночасно з МОН-транзисторами. Якщо за структурою вони виготовлені аналогічно до транзисторів, то підбором напруги затвора можна установити необхідний опір резистора.

3.6 Напівпровідникові конденсатори

У дифузійних конденсаторах НІМС використовується бар'єрна ємність p-p-переходу. Ємність такого конденсатора (рис. 3.17) залежить від площини переходу, діелект-

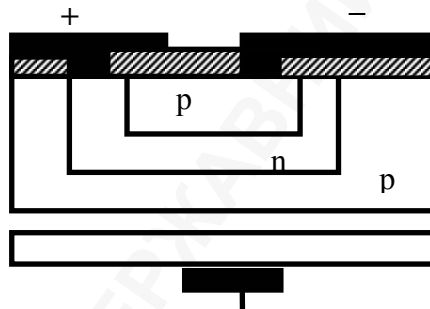


Рисунок 3.17 - Структура дифузійного конденсатора ричної проникності напівпровідника та товщини переходу, яка, у свою чергу, залежить від концентрації домішок. Якщо потрібна більша ємність, то перехід роблять одночасно з емітерними переходами транзисторів. Оскільки область емітера має електропровідність n^+ -типу, перехід в конденсаторі буде більш тонким. Ємність таких конденсаторів не перевищує величину $c = 1500$ пФ з допуском $\pm 20\%$. Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) складає величину $\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, пробивна напруга U_p не перевищує 10 В. Працюють дифузійні конденсатори тільки

при зворотній напрузі, яка для одержання постійної ємності повинна бути постійною. Оскільки бар'єрна ємність нелінійна, то дифузійний конденсатор може працювати як конденсатор змінної ємності, яка регулюється шляхом зміни постійної напруги на ньому. Зворотна напруга змінюється в межах 1 - 10 В, ємність можна змінювати у 2 - 2,5 разу.

Другий тип конденсаторів інтегральних схем - МОН-конденсатори, які застосовують в схемах на МОН-транзисторах. Одна обкладинка - дифузійний шар Si типу n^+ , на якій нанесено тонкий шар діелектрика SiO_2 . Друга - металева (найчастіше Al) плівка, нанесена поверх вищезазначеного шару. Номінали таких конденсаторів бувають до 500 пФ з допуском $\pm 25\%$. Пробивна напруга $U_{\text{п}} = 20$ В. Переваги МОН-конденсаторів - низький ТКЄ - $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ та можливість роботи при будь-якій полярності. Нелінійність ємності, тобто залежність її від напруги значно менша, ніж у дифузійних конденсаторів.

3.7 Індуктивність у НІМС

Котушки індуктивності в напівпровідникових інтегральних схемах зробити неможливо. Тому ІМС проектується так, щоб індуктивність була не потрібна. Якщо все ж таки необхідно мати індуктивний опір, то можна створити еквівалент індуктивності, який складається з транзистора, резистора і конденсатора. Приклад одного з таких еквівалентів показано на рисунку 3.18. Змінна напруга U підводиться між колектором та емітером

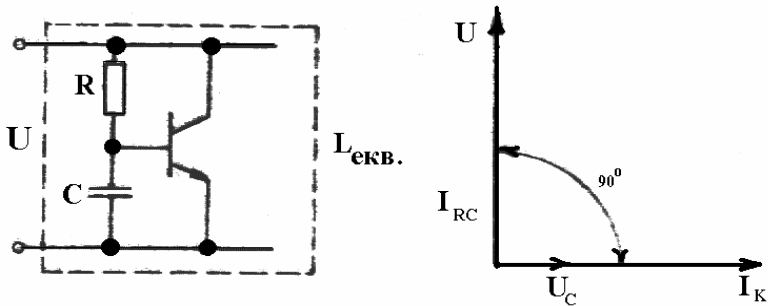


Рисунок 3.18 - Еквівалент індуктивності

транзистора. Для спрощення не показана подача на транзистор постійної напруги. Частина змінної напруги U через RC -ланцюг подається на базу. Значення R та C підібрані так, що $R \gg 1/(\omega C)$. Тоді струм I_{RC} в RC -ланцюзі можна приблизно вважати таким, що збігається за фазою з напругою U . Але напруга U_C на конденсаторі відстає від струму I_{RC} на 90° . Напруга U_C подається на базу та керує колекторним струмом транзистора I_K , який збігається по фазі з напругою U_C , тобто відстає від напруги U на 90° .

Таким чином, транзистор в цій схемі створює для напруги U опір, еквівалентний деякому індуктивному опору $x_L = U/I_K = \omega L_{екв}$. Інакше кажучи, транзистор є еквівалентним деякій індуктивності $L_{екв} = U/(\omega I_K)$. Якщо встановлювати більше чи менше значення струму I_K , можна одержувати різні значення $L_{екв}$. Оскільки опір RC -ланцюга в багато разів більший x_L , то впливом цього ланцюга нехтують.

РОЗДІЛ 4 ГІБРИДНІ ІНТЕГРАЛЬНІ МІКРОСХЕМИ

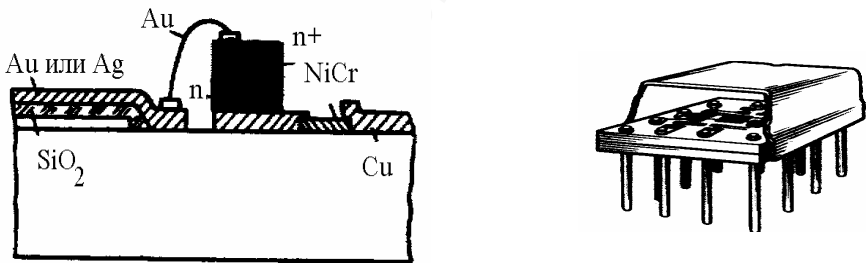
4.1 Конструкція плівкових та гібридних ІМС

У плівкових інтегральних мікросхемах елементи реалізуються у вигляді плівок різної конфігурації з різних

матеріалів. В залежності від товщини плівок, які використовуються, та способу їх нанесення розрізняють тонкоплівкові та товстоплівкові інтегральні мікросхеми.

Усі елементи плівкової ІМС та з'єднання між ними наносять в необхідній послідовності та конфігурації через трафарети на нагріту відполіровану підкладку (найчастіше керамічну). ІМС, в яких пасивні елементи (резистори, конденсатори) виконані у вигляді плівок, а активними є напівпровідникові прилади або кристали мікросхем, називають *гібридними* (рис. 4.1 а).

У даний час не існує стабільних плівкових елементів (діодів, транзисторів), оскільки виникають великі труднощі при виготовленні якісних монокристалічних напівпровідникових плівок. Так, наприклад, монокристалічні напівпровідникові плівки, одержані напыленням у вакуумі, незважаючи на заходи, що



а б

Рисунок 4.1 - Структура гібридної інтегральної мікросхеми (а), загальний вигляд товстоплівкової ІМС (б)

вживаються, завжди містять небажані домішки, які призводять до нестабільності і короткого терміну служби активних елементів.

При виготовленні гібридних ІМС активні елементи розміщують на платі з пасивними елементами - тонко-

плівкової або товстоплівкової ІМС. Активними елементами гібридної ІМС є дискретні напівпровідникові мініатюрні елементи (діоди і транзистори), а також діодні і транзисторні матриці. Активні елементи для гібридних ІМС застосовують або безкорпусними, поверхня яких захищена за допомогою спеціальних захисних покриттів (лак, емаль, смола, компаунд та ін.), або в мініатюрних металевих корпусах.

Найбільш поширеною є конструкція товстоплівкової інтегральної мікросхеми, яка являє собою керамічну підкладку з пасивними та активними елементами з необхідною кількістю виводів, закриту з боку електричної схеми металевим колпачком та залиту із зворотного боку ізолюючим компаундом (рис. 4.1 б).

Основні переваги товстоплівкових ІМС- невеликі витрати при експлуатації обладнання та можливість виготовлення резисторів великих номіналів. Недоліком мікросхем на товстих плівках є труднощі при одержанні конденсаторів великої ємності ($c \geq 0,2$ мкмФ/см²).

Перевагами гібридних ІМС є: можливість створення широкого класу цифрових та аналогових мікросхем при короткому циклі їх розробки; універсальність методу конструювання мікросхем, яка дозволяє застосовувати безкорпусні ІМС, МДН-прилади, діодні та транзисторні матриці як активні елементи; високий процент виходу придатних мікросхем.

4.2 Підкладки плівкових інтегральних мікросхем

Підкладки в технології виготовлення та конструюванні плівкових та гібридних інтегральних мікросхем в мікроборках відіграють дуже важливу роль. Підкладки є основою для групового формування на них

ІМС, головним елементом ІМС і мікрозборок, які виконують роль механічної опори, забезпечують тепловідвід та електричну ізоляцію елементів.

Підкладка - це заготовка для нанесення елементів гібридних та плівкових ІМС, міжелементних або міжкомпонентних з'єднань, а також контактних площинок.

Матеріал, геометричні розміри та стан поверхні визначають якість елементів, які формуються, та надійність функціонування ІМС та мікрозбирань. Різноманітні способи формування плівкових елементів, монтажу та збирання, а також різноманітність функцій, які виконують гібридні ІМС, диктують різноманітні та суперечливі вимоги до підкладок.

Матеріал підкладки повинен мати:

1) високий питомий електричний опір ізоляції, низьку діелектричну проникність та малий тангенс кута діелектричних втрат, високу електричну міцність для забезпечення якості електричної ізоляції елементів та компонентів як на постійному струмі, так і в широкому діапазоні частот;

2) високу механічну міцність в малих товщинах;

3) високий коефіцієнт теплопровідності для ефективної передачі теплоти від тепловидільних елементів та компонентів до корпусу (для ІМС) або елементів конструкції блока (для мікрозбирань);

4) високу хімічну інертність до осаджених матеріалів для зменшення нестабільності параметрів плівкових елементів, зумовленої фізико-хімічними процесами на межі плівка - підкладка;

5) високу фізичну та хімічну стійкість до високої температури в процесі нанесення тонких плівок, термообробки при формуванні товстих плівок та зборки ІМС;

6) стійкість до хімічних реактивів при електрохімічних та хімічних методах обробки та формування плівкових елементів;

7) мінімальне газовиділення у вакуумі для уникнення забруднення плівок, які наносяться;

8) здатність до гарної механічної обробки (полірування поверхні, різання).

Крім того, матеріал підкладки повинен мати температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТК l), близький до ТК l плівок, які напильються для забезпечення достатньо малих механічних напружень в плівках, бути недефіцитним і недорогим.

Структура матеріалу підкладки та стан її поверхні має суттєвий вплив на структуру плівок та параметри плівкових елементів. Для забезпечення високої надійності плівкових елементів підкладки повинні мати мінімальну шорсткість поверхні, бути без пор і тріщин. Так, при нанесенні тонких плівок товщиною до 100 нм припустима висота нерівностей не повинна перевищувати 25 нм, що відповідає 14-му класу чистоти поверхні підкладок для тонкоплівкових ІМС. Товсті плівки наносять товщиною до 50 мкм, тому підкладки для товстоплівкових ІМС можуть мати нерівності до 2 мкм, що відповідає 8-му класу чистоти.

Останнім часом немає такого матеріалу для підкладок, який би в однаковій мірі задовольняв різноманітні вимоги. Багато органічних матеріалів не можуть бути використані як матеріал для підкладок, тому що виготовлення плівкових елементів мікросхем проводиться у вакуумі та при підвищених температурах. Виняток - лавсан (полімерний матеріал). Тому для виготовлення підкладок використовують в основному скло, кераміку, ситал та фотоситал.

Скло. Найкращими для підкладок є боросилікатні та алюмосилікатні сорти скла. Шляхом листового прокату цих

сортів скла одержують досить гладку поверхню без полірування. Полірування зменшує мікронерівності (менше 10 нм), але воно значно дорожче, ніж листовий прокат. Крім того, при поліруванні скляних підкладок можуть погіршитися їх поверхневі властивості. Недолік підкладок із скла - мала теплопровідність, що не дозволяє застосовувати їх при підвищеному нагріві. При інтенсивному нагріві використовують скло «Пирекс», кварц та кварцове скло.

Кераміка. Керамічними матеріалами для підкладок тонкоплівкових та товстоплівкових мікросхем є кераміка на основі окису алюмінію, кераміка «Поликор» та берилієва кераміка. Важливою перевагою керамічних підкладок у порівнянні із скляними є їх висока теплопровідність. Так, наприклад, кераміка на основі окису берилію має в 200 - 250 разів більшу теплопровідність, ніж скло. Однак навіть незначна добавка деяких домішок (наприклад, окису алюмінію) різко зменшує теплопровідність кераміки. До недоліків кераміки слід віднести значну шорсткість поверхні. Мікронерівності необробленої кераміки можуть складати декілька тисяч ангстремів і дуже зменшуються після полірування. Однак полірування може забруднити поверхню та змінити властивості кераміки. Суттєве зниження шорсткості досягається глазуруванням поверхні кераміки тонким шаром спеціального скла або тонким шаром окису танталу. При цьому висока теплопровідність керамічної основи поєднується з гладкою поверхнею скляної глазури.

Ситал. Ситал - склокерамічний матеріал, який одержують шляхом термообробки (кристалізації) скла. За своїми властивостями ситал перевершує скло. Він добре обробляється: його можна пресувати, витягувати, прокатувати та відливати центробіжним способом. Ситал витримує в повітряному середовищі різкі перепади

температури від -60 до $+700^{\circ}\text{C}$. Він має високий електричний опір, який зменшується з підвищенням температури. За електричною міцністю ситал не поступається кращим сортам вакуумної кераміки, а за механічною міцністю він в два-три рази міцніше за скло. Ситал має високу хімічну стійкість до кислот, не пористий, дає незначну усадку, газонепроникний і має малу газовіддачу при високих температурах.

Фотоситал. Фотоситал - матеріал, який одержують шляхом кристалізації світлочутливого скла. Він складається з SiO (75%), Li_2O (11,5%), Al_2O_3 (10%) та K_2O (3,5%) з невеликими добавками Ag_2NO_3 та CeO_2 . Фотоситал є стійким до кислот, він має високу механічну та термічну стійкість, його теплопровідність в декілька разів більша, ніж у ситалу.

4.3 Плівкові резистори

При виготовленні плівкових резисторів на підкладку наносять резистивні плівки. В залежності від опору резистора, плівка робиться або зі сплаву високого опору (наприклад, ніхром), або із суміші металу з керамікою (кермету). На кінцях резистивної плівки роблять виводи у вигляді металевих плівок, що разом з тим є лініями, що з'єднують резистор з іншими елементами. Опір плівкового резистора залежить від товщини і ширини плівки, її довжини та матеріалу. Для збільшення опору використовують плівкові резистори зигзагоподібної форми. На рисунку 4.2 показана структура плівкових резисторів.

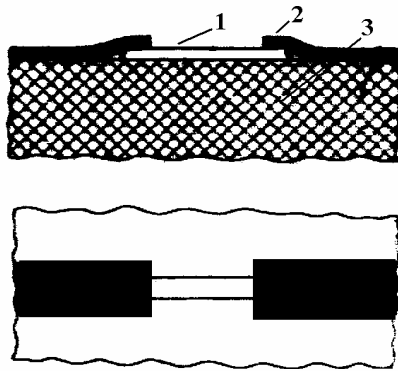


Рисунок 4.2 - Плівковий резистор: 1 - резистивна плівка; 2 - вивід; 3 - підкладка

Питомий опір плівкових резисторів виражають в особливих одиницях - омах на квадрат ($\text{Ом}/\square$), тому що опір даної плівки у формі квадрата не залежить від розмірів цього квадрата. Дійсно, якщо зробити сторону квадрата, наприклад, у два рази більшою, то довжина шляху струму збільшиться вдвічі, але й площа поперечного перерізу плівки для струму також збільшиться вдвічі; отже, опір залишиться без зміни.

Найважливішим параметром для плівкових резисторів є термічний коефіцієнт опору β . Як правило, його визначають для стабільних плівок, які пройшли термообробку. Установлено, що коефіцієнт β залежить від товщини плівки, причому із зменшенням товщини β зменшується, а при збільшенні наближається до значення, яке характерне для масивного металу. Для окремих типів металевих плівок $\beta < 0$ і може бути різним в залежності від технології одержання плівок. Важливим завданням при розробленні резисторів ІМС є одержання найменшого значення β в діапазоні робочих температур. Як показують

результати досліджень, існує область товщин плівок, для якої є характерним малий термічний коефіцієнт опору, який наближається до нульового значення. Ця область товщин називається перехідною. Для конкретного матеріалу вона визначається умовами одержання плівки та може переміщуватися в залежності від цих умов.

Розглянемо характеристики плівкових резисторів та матеріали, які застосовують для їх виготовлення (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 - Характеристики плівкових резисторів

Матеріал	Контактна площадка	ρ_s , Ом/□	$\beta 10^4$, K^{-1}
Хром Cr	Au	10 - 50	6 - 15
Ніхром Ni-Cr	Cu	30 0	± 1
Тантал Ta	Al/Ni-Cr	20 - 100	-2

Тонкоплівкові резистори за точністю і стабільністю кращі, ніж товстоплівкові, але виробництво їх складніше і дорожче. Тонкоплівкові резистори мають питомий опір від $\rho_s = 10 - 300$ Ом/□ і номінали - від 10 до 10^6 Ом. Точність їх виготовлення $\pm 5\%$, з підгонкою - $\pm 0,05\%$. Підгонка - це процес часткового видалення резистивно-го шару для збільшення опору до необхідного значення. Температурна стабільність тонкоплівкових резисторів характеризується значенням коефіцієнта $\beta \sim 0,25 \cdot 10^{-4} K^{-1}$. Протягом тривалого часу експлуатації опір цих резисторів практично не змінюється.

Товстоплівкові резистори мають такі параметри: питомий опір $50\text{ Ом}/\square$ - $1\text{ МОм}/\square$, номінали $(0,5 - 5 \cdot 10^8)$ Ом, точність без підгонки $\pm 15\%$, точність з підгонкою $\pm 0,2\%$, $\beta \sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Їх стабільність гірша, ніж у тонкоплівкових резисторів.

На сучасному етапі розвитку електроніки для створення терморезисторів широко застосовуються дво- та багатошарові плівкові матеріали у зв'язку з їх високою функціональністю. Понад 30 світових фірм займаються виготовленням терморезисторів: «Bell and Howell», «Micro Gauge Inc.», «Micro Measurements» (США); «Gauge Technique», «Welwyn Electric» (Великобританія); «Philips» (Голландія) та ін.

Матеріали для виробництва терморезисторів повинні давати можливість регулювання провідності в широких межах, мати малий коефіцієнт $\beta \sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ та стабільні характеристики у робочому діапазоні температур.

Розроблені різноманітні методики одержання малого значення β (в основному вони базуються на методі термічної обробки багатошарових, шаруватих та багатокомпонентних матеріалів) і стабільних робочих характеристик плівкових елементів терморезисторів. Накопичений значний теоретичний і експериментальний матеріал з досліджень електрофізичних та термодинамічних властивостей, мікроструктури та фазового складу, дифузійних процесів в багатошарових та багатокомпонентних плівкових матеріалах мікроелектроніки.

4.4 Плівкові конденсатори

Плівкові конденсатори виготовляють з двома обкладинками, одна з яких формується на підкладці у

вигляді з'єднувальної лінії, потім на неї наноситься діелектрична плівка, а зверху - друга обкладинка, яка також переходить в з'єднувальну лінію (рис. 4.3). В залежності від товщини діелектрика плівкові конденсатори бувають тонко- та товстоплівковими.

Діелектрик плівкового конденсатора повинен відповідати таким вимогам: бути ізолюючим матеріалом, здатним утворювати непористі плівки; мати високу адгезію до матеріалу підкладки; бути стійким до змін температури; мати пробивну напругу 100 - 200 В;

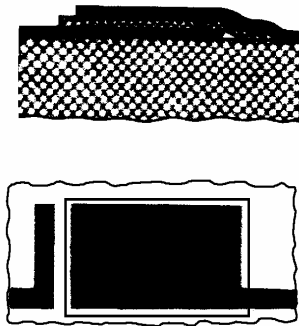


Рисунок 4.3 - Плівковий конденсатор

температуру випаровування 1000 - 1200 °С; бути сумісним з матеріалом обкладинок.

Для виготовлення плівкових конденсаторів використовують такі сполуки: SiO, SiO₂, GeO, ZnS, MgF₂, BaTiO₃, CrTiO₃, Al₂O₃, TaO (таблиця 4.2). Матеріалом для обкладинок найчастіше є Al, тому що він має низький електричний опір та температуру випаровування.

У конденсаторах ІМС використовують плівки досить великої товщини. Так, товщина анодованих плівок складає $d > 100\text{Å}$, а товщина оксидних $d > 500\text{Å}$. Необхідність використання більш товстих діелектричних плівок

обумовлена тим, що одержання суцільних плівок малої товщини з постійними параметрами є досить складним. Оцінку діелектричних властивостей плівок проводять за результатами одночасного вимірювання

Таблиця 4.2 - Характеристики плівкових конденсаторів

Діелектрик	Обкладинка	Діел. проник., ϵ	TKE $10^4, K^{-1}$	Методи нанесення
Моноокисел кремнію SiO	Al	5 - 6	3,5	термічне напил.
Моноокисел германію GeO	Al	10 - 12	3 - 5	термічне напил.
Двоокисел кремнію SiO ₂	Al	4	2	іонно-пл. Розпил.
Оксид алюмінію Al ₂ O ₃	Al+Ni	8	3 - 4	реактивне напил.
Окисел танталу TaO	Ta+V	20 - 23	4	анодування

емності та тангенса кута нахилу діелектричних втрат на визначеній частоті. Коефіцієнт втрат δ складається з діелектричних втрат відносно різних механізмів (вектор поляризації діелектрика не встигає переміщуватися за перемінним електричним полем) та втрат, які виникають за рахунок послідовного з'єднання електродів з діелектриком і характеризуються частотною залежністю. Отже, для зменшення коефіцієнта δ необхідно виконувати електроди на досить високих частотах і з металів з малим питомим опором. Діелектричні втрати також сильно залежать від умов осадження плівок. Дослідження коефіцієнта δ , проведене в широкому діапазоні частот для різних діелектричних плівок, дозволяє виявити такі загальні

закономірності: діелектричні втрати зменшуються через старіння плівок; на частотах, нижчих 100 кГц, коефіцієнт δ зменшується із збільшенням частоти і збільшується при адсорбуванні плівками вологи.

4.5 Індуктивні елементи гібридних інтегральних мікросхем

Плівкові котушки, які застосовуються у гібридних інтегральних мікросхемах, бувають двох типів: перший тип - мікрокотушки, які монтуються на плату ГІМС, другий тип - котушки у вигляді плоских спіралей (рис.4.4), найчастіше прямокутної форми, які одержуються шляхом плівкової технології на діелектричній підкладці. Ширина провідних смужок і просвітів між ними складає кілька десятків мікрометрів, індуктивність не більше декількох мікрогенрі. Збільшити індуктивність можна нанесенням на котушку феромагнітної плівки, що буде виконувати роль осердя. Якщо необхідно прикріпити вивід до внутрішнього кінця плівкової котушки, то на відповідне місце котушки

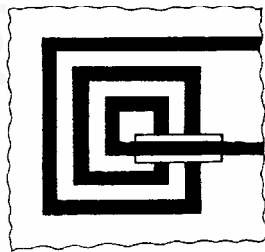


Рисунок 4.4 - Плівкова котушка

наносять діелектричну плівку, а потім поверх неї металеву плівку - вивід. При проектуванні індуктивних елементів застосовують співвідношення (4.1) та (4.2):

$$L = \left(\frac{k}{l}\right) D_1^3, \quad (4.1)$$

$$l_0 = \frac{\rho(k^2 - 1)10^{-4} \cdot Q}{16\pi D_1 k^2 \alpha}, \quad (4.2)$$

де L - індуктивність; k - коефіцієнт, який характеризується відношенням зовнішнього діаметра до внутрішнього; l - крок спіралі (сума ширини витка та відстані між витками); l_0 - ширина витка, мм; ρ - питомий опір матеріалу; d - товщина плівки; Q - добротність; ν - робоча частота.

Якщо виготовити дві плоскі котушки з протилежних боків підкладки, можна одержати плівковий трансформатор. Товщина підкладки буде визначати величину взаємної індукції. Але коефіцієнт взаємної індукції буде низьким, тому що матеріалом підкладки є магнетик.

4.6 Плівкові провідники, контактні площадки та міжшарова ізоляція

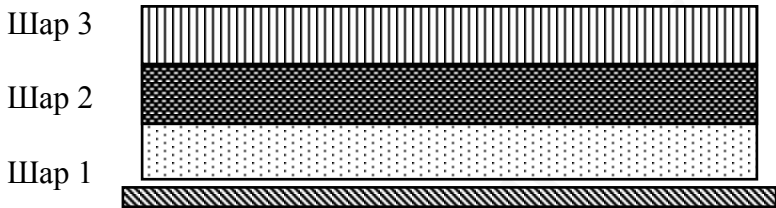
У гібридних інтегральних мікросхемах з'єднання між елементами виготовляють з металевих плівок, які повинні мати такі властивості: високу електропровідність (низький питомий опір); достатньо високу адгезію до діелектричної підкладки; корозійну стійкість; забезпечувати можливість з'єднання контактів з дроту.

Жоден із існуючих металів не відповідає усім цим вимогам, тому що все більшого застосування в мікроелектроніці набувають багатошарові плівкові структури (багатошарові плівки). Розглянемо тришарову плівку (рис. 4.5) як паралельне з'єднання трьох окремих шарів (співвідношення 4.3, 4.4):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad (4.3)$$

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}. \quad (4.4)$$

Достатньо, щоб один із шарів мав великий опір. Нижній шар багат шарової плівки виготовляють із матеріалів, які мають високу адгезію до підкладки (Cr, Mn, V, Ni-Cr).



Підкладка

Рисунок 4.5 - Загальний вигляд тришарової плівки

За певних умов плівки вищезазначених металів можуть утворювати оксиди з фазовим складом $Me + MeO$. Наявність оксиду забезпечує високу адгезію плівок. Товщина адгезійного шару $d \cong 300 - 500 \text{ \AA}$. Для забезпечення високої електропровідності застосовують плівки Ni, Cu, Au, Al. Таблиця 4.3 ілюструє типові характеристики найбільш поширених матеріалів, які використовують для виготовлення міжелементних з'єднань та контактних площадок мікросхем.

Для одержання тришарової плівки конденсацію у вакуумі необхідно провести три рази, тому вакуумна установка повинна мати три випарника. Конденсація шарів відбувається по черзі на підігріту підкладку для

Таблиця 4.3 - Характеристики матеріалів для виготовлення міжелементних з'єднань та контактних площадок

Матеріал	Товщина, А	Питомий опір, Ом·м	Спосіб приєднання зовнішніх виводів

Підшар Ni-Cr Шар2 Au	100 -300 6000 - 8000	0,03 - 0,04	Паяння мікропаяльником; зварювання непрямым імпульсним нагріванням
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Cu Шар 3 Ni	100 - 300 4000 - 10000 500 - 700	0,02 - 0,04	Зварювання непрямым імпульсним нагріванням
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Cu Шар 3 Ag	100 - 300 4000 - 10000 800 - 1000	0,02 - 0,04	Паяння мікропаяльником; зварювання непрямым імпульсним нагріванням
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Cu Шар 3 Au	100 - 300 6000 - 8000 500 - 600	0,02 - 0,04	Паяння мікропаяльником; зварювання непрямым імпульсним нагріванням
Шар 1 Ni-Cr Шар 2 Al Шар 3 Ni	400 - 500 2500 - 3500 500 - 700	0,10 - 0,20	Зварювання подвійним електродом

забезпечення достатньої адгезії. Після конденсації необхідно провести термічну обробку плівок для кристалізації та заліковування дефектів.

У тонкопліткових ІМС виникає необхідність у перетинанні провідників один одним. Для цього потрібно використовувати конденсацію діелектричного шару. Експериментально показано, що ємність одного перетинання для успішної роботи мікросхеми повинна бути

$\epsilon \leq 2$ пФ. Як матеріали для діелектричного шару використовують моноокисел кремнію та халькогенідне скло. Ці матеріали мають питомий опір $\rho \sim 10^{14}$ Ом·м, пробивну напругу $U_{пр} \sim 10^6$ В, питому ємність $C_1 = 1700$ пФ/см² (для Si) та $C_2 = 5000$ пФ/см² (для халькогенідного скла). При використанні міжшарової ізоляції у структурі Ме-діелектрик-Ме виникають гальванодифузійні ефекти. Суть полягає в тому, що атоми металу будуть дифундувати в шар діелектрика під дією зовнішнього поля, в результаті чого відбувається руйнування діелектрика.

РОЗДІЛ 5 ВЕЛИКІ ІНТЕГРАЛЬНІ СХЕМИ (ВІС)

5.1 Загальна характеристика та основні параметри ВІС

Основною тенденцією інтегральної мікроелектро-ніки є підвищення ступеня інтеграції мікросхем. Поряд з цим зростає функціональна складність ІМС. Для сучасної мікроелектроніки характерна комплексна інтеграція: технологічних процесів, елементів на підкладці, схемних функцій у межах єдиної структурної одиниці, нових фізичних явищ, методів проектування й етапів процесу створення мікросхем. Збільшення ступеня інтеграції пов'язано зі зменшенням розмірів активних і пасивних елементів, удосконаленням технології виготовлення й обробки підкладок великих розмірів, використанням нових активних елементів, які мають технологічні та функціональні переваги і підвищену надійність. Збільшення числа елементів і зростання функціональної густини обумовили створення мікро-схем з високим ступенем інтеграції - великих інтегральних схем (ВІС).

Основними параметрами, що характеризують конструктивно-технологічні і схематичні особливості ВІС, є ступінь інтеграції, функціональна складність, інтегральна густина, функціональна густина і інформаційна складність.

Функціональна складність - середнє число перетворень у мікросхемі, що припадають на одну змінну:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=p} B_i \cdot N_{0i}}{n}, \quad (5.1)$$

де $\sum_{i=1}^{i=p} B_i$ - кількість однокаскадних логічних елементів в інтегральній мікросхемі; N_{0i} - кількість розгалужень на виході кожного i -го каскаду; n - кількість змінних, поданих на входи інтегральної мікросхеми.

Інтегральна густина - кількість елементів, які припадають на одиницю площі ВІС:

$$\varpi = \frac{N}{S} = \frac{10^k}{S}. \quad (5.2)$$

Функціональна густина - кількість перетворень з однією змінною, які припадають на одиницю площі ВІС:

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (5.3)$$

Інформаційна складність - середня кількість елементів у ВІС, які припадають на перетворення однієї змінної:

$$H = \frac{N}{F} = \frac{10^k \cdot n}{\sum_{i=1}^{i=p} B_i \cdot N_{0i}}. \quad (5.4)$$

Великі інтегральні схеми є складними мікросхемами. В їх об'ємі реалізуються блоки, вузли та навіть електронні пристрої. Тому ВІС не мають широкої універсальності та використовуються в основному для конкретних типів апаратури.

5.2 Класифікація та сфери застосування ВІС

Перехід до великих інтегральних схем вимагає нових якісних змін у конструюванні радіоелектронної апаратури. Виготовлення в єдиному технологічному процесі складного функціонального вузла дозволяє робити найкращу оптимізацію його параметрів, тому що ведеться розрахунок не окремих моментів, а вузла в цілому. Об'єднання елементів у ВІС підвищує швидкодія вузлів, зменшує їх сприйнятливність до перешкод: скорочується затримка передачі сигналу, досягається добрий захист елементів від зовнішніх перешкод. Крім підвищення ступеня інтеграції в межах конструктивно оформленої мікросхеми, ВІС дає можливість одержати більш високі якісні показники і велику надійність радіоелектронних пристроїв при менших витратах.

Підвищення надійності ВІС досягається шляхом зменшення числа з'єднань у межах одного реалізованого вузла і скорочення кількості технологічних операцій. Зниження вартості ВІС у порівнянні з вузлами на звичайних мікросхемах обумовлюється прогресом технології, що дозволяє збільшувати ступінь інтеграції, і зменшенням обсягу монтажних робіт.

За видом інформації, яка обробляється, ВІС можна класифікувати на цифрові й аналогові. Цифрові ВІС використовують у пристроях обробки інформації, до яких відносять напівпровідникові запам'ятовувальні пристрої, багаторозрядні регістри, лічильники, суматори й ін. Прикладами аналогових ВІС є перетворювачі напруга - код і код - напруга, блоки апаратури зв'язку (тракти високої і

проміжної частот, формувачі сигналів, багатокаскадні схеми радіопристроїв і т.д.).

За ступенем застосованості в розробках апаратури розрізняють ВІС загального і спеціального призначення. Прикладами цифрових ВІС загального призначення є різні напівпровідникові запам'ятовувальні пристрої, регістри, дешифратори, підсистеми і спеціальні обчислювачі. Аналогові ВІС загального призначення - це підсистеми взаємного перетворення напруги в код, прецизійні операційні підсилювачі вищого класу, підсилювачі для високоякісного відтворення звуку, НВЧ-підсистеми модулів для фазованих антенних решіток та інші пристрої. До аналогових ВІС спеціального призначення відносяться підсилювальні тракти радіоприймальних і радіопередавальних пристроїв на фіксовані частоти, формувачі частот з послідовності, обумовленої частотами генераторів, що задають, чи зовнішньою тактовою частотою, інші підсистеми.

Найбільше застосовуються ВІС в обчислювальних системах із продуктивністю порядку декількох мільйонів операцій за секунду, де використовують в основному напівпровідникові і гібридні ВІС. Розвиток ВІС відбувається в напрямку збільшення ступеня їхньої інтеграції і створення надвеликих інтегральних мікросхем (НВІС). Кількість функціональних елементів у них може складати кілька тисяч і навіть десятків тисяч. Багатокристалльні НВІС можуть поєднувати в одному корпусі кілька кристалів ВІС і дискретних безкорпусних активних елементів, що утворюють, наприклад, всю електронну частину обчислювальної машини. При розробленні таких мікросхем вирішують задачі не тільки схемотехніки, але й системотехніки.

5.3 Особливості конструкції великих напівпровідникових мікросхем

Конструкція напівпровідникових ВІС визначається типом використовуваних активних елементів і їх структурою, кількістю рівнів і методом створення системи внутрішньосхемних між'єднань, а також типом корпусу, причому від конструктивних способів реалізації ВІС залежать їх схемотехнічні можливості.

Основними активними елементами, на базі яких створюються сучасні ВІС, є біполярні транзистори планарно- епітаксiального типу (БТ) та МДН-транзистори (МДНТ). Найбільшого поширення дістали ВІС на основі МДН - транзисторів, що обумовлено їх унікальними властивостями і можливістю збільшення ступеня інтеграції. Порівняння ВІС однакового функціонального призначення на БТ і МДНТ показує, що за електричними параметрами - швидкодією і добротністю (відношення швидкодії до споживаної потужності) - схеми на біполярних транзисторах перевершують схеми на МДН-транзисторах. Однак площа, займана МДНТ разом з контактними площадками, приблизно в 5 разів менша від площі БТ. Великі інтегральні мікросхеми на МДН-транзисторах мають ряд переваг перед ВІМС на біполярних транзисторах, а саме: значно менші розміри активних елементів; низький рівень розсіюваної потужності; додаткові схемотехнічні можливості; простота технології виготовлення МДН-структур.

Наведемо приклад. Велика інтегральна мікросхема процесора кишенькового мікрокалькулятора на МДН - структурах містить 3400 елементів на кристалі розміром 5,2x5,2 мм. ВІС запам'ятовувального пристрою цього калькулятора реалізована на кристалі розміром 3x2,5 мм з кількістю елементів 1490.

Технологія виготовлення напівпровідникових ВІС базується на стандартних технологічних методах, які використовують у промисловості при виготовленні ІМС-термічному окислюванні кремнію, фотолітографії, дифузії

та епітаксiальному нарощуваннi. За допомогою цих методiв в об'ємi та на поверхнi напiвпровiдникової пластини створюють активнi i пасивнi елементи та iзоляцiю мiж ними.

5.4 Особливостi конструкцiї гiбридних ВiС

Гiбридний метод конструювання та виготовлення ВiС полягає в компонуваннi двох частин, виконуваних окремо: безкорпусних дискретних елементiв та iнтегральних мiкросхем; плiвкової багат шарової комутацiйної плати на диелектричнiй пiдкладцi.

Гiбридний спiсiб створення ВiС є найбільш унiверсальним, оскiльки в ньому поєднуються переваги плiвкової i напiвпровiдникової технологiї, забезпе-чується можливiсть використання рiзних iнтегральних мiкросхем (напiвпровiдникових, тонкоплiвкових), що розрiзняються як за функцiональним призначенням, так i за конструктивним виконанням. За надiйнiстю та густиною упакування гiбриднi ВiС поступаються напiвпровiдниковим, але за функцiональним призначенням i ступенем iнтеграцiї можуть їх перевершувати. Оскiльки в гiбридних ВiС використовуються IМС й iншi елементи рiзного функцiонального призначення, вони найбільш придатнi для побудови неоднорiдних аналогових пристроїв, наприклад, перетворювачiв напруга - код чи код - напруга. Технологiчний процес виготовлення гiбридних ВiС значно простiший i дешевший за рахунок застосування структур стандартної конструкцiї та можливостi автоматизацiї процесу складання.

Основним конструктивним елементом гiбридних ВiС є комутацiйна плата, що являє собою систему багат шарового розведення й утримує в окремих випадках плiвковi резистори i конденсатори. Проекту-

вання комутацiйних плат здiйснюють машинними методами, оскiльки топологiю плiвкових провiдникiв

розраховують з урахуванням усіх необхідних схемотехнічних, конструктивних та технологічних параметрів для оптимального розміщення націпних компонентів і мікросхем. Формування структури гібридної ВІС являє собою складання-монтаж націпних компонентів і мікросхем на комутаційній платі.

5.5 Надійність інтегральних мікросхем

Надійність інтегральної мікросхеми - це її властивість зберігати значення встановлених параметрів функціонування в означених межах, які відповідають заданим режимам та умовам користування, технічного обслуговування, зберігання та транспортування. Це комплексна властивість, яка в залежності від призначення виробу та умов його експлуатування може містити безвідмовність, довговічність, та ремонт-топридатність окремо або поєднання цих властивостей як виробу в цілому, так і його частин.

При оцінці надійності ІМС використовують такі поняття:

- *критерій придатності* - параметр, за значенням або зміною якого ІМС враховують придатною або такою, що відмовила;

- *відмова* - повна втрата роботоздатності ІМС або відхід одного або декількох параметрів, які були встановлені технічними умовами як критерії придатності, за межі заданих норм;

- *повна відмова* - порушення електричної, механічної або теплової міцності ІМС (коротке замикання, пробій діелектрика, відрив виводу та ін.), а також відхід параметрів за критичні значення, при яких ІМС стає практично нероботоздатною в будь-якому пристрої при допустимих умовах експлуатування;

- *умовна відмова* - відмова, що виникає в результаті поступового відходу одного або декількох параметрів (без втрати роботоздатності мікросхеми) за умовну норму, яка

зазначена в технічних умовах. Розрізняють катастрофічні, поступові та параметричні умовні відмови;

- *довговічність* - властивість ІМС довго (з можливими у процесі експлуатації перервами) зберігати роботоздатність в означених режимах та умовах експлуатації до повного виходу із строю. Календарну тривалість експлуатування мікросхем до повного виходу із строю називають терміном приданості;

- *інтенсивність відмов* - середня кількість відмов за одиницю часу;

- *ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$* - ймовірність того, що за певними умовами експлуатації протягом певного проміжку часу не відбудеться жодної відмови;

- *ризик замовника β* - ймовірність того, що за результатами відбіркового контролю можуть бути взяті ІМС, які не відповідають вимогам технічних умов;

- *ризик виготовлювача α* - ймовірність того, що за результатами відбіркового контролю можуть бути забраковані ІМС, які не відповідають вимогам технічних умов.

Важливими показниками надійності ІМС також є : мінімальний наробіток на відмову t_n - час роботи ІМС в заданому режимі, в якому відмови практично відсутні; ресурс роботи t_γ - час наробітку ІМС до граничного стану; термін зберігання $t_{зб}$ - час, протягом якого ІМС зберігає свої технічні та експлуатаційні показники при зберіганні в спеціальних приміщеннях або апаратурі.

Показники t_n , t_γ , $t_{зб}$ використовують для задання вимог з надійності в технічному завданні та нормативно-технічній документації, у тому числі в технічному паспорті на ІМС. Для інтегральних мікросхем широкого використання встановлені наступні вимоги до показників надійності. Мінімальна ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ при експлуатації в максимально допустимому електричному режимі та максимальній температурі протягом 500 годин повинна бути не менше 0,95 для ІМС

першого ступеня інтеграції), 0,90 - другого ступеня інтеграції та 0,85 - для ІМС третього ступеня інтеграції. Мінімальний наробіток на відмову повинен складати 10000 годин, термін зберігання ІМС в корпусному виконанні - не менше 6 років, в безкорпусному - не менше 2 років.

На надійність ІМС можуть впливати також різка зміна навколишньої температури, вологість середовища, механічні навантаження та радіоактивне випромінювання.

Постійне відпрацювання технологічних операцій, удосконалювання корпусного захисту та автоматизація виробничих процесів дозволяють підвищувати надійність інтегральних мікросхем.

РОЗДІЛ 6 СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОНІКИ

6.1 Функціональна мікроелектроніка

Функціональна мікроелектроніка - це галузь електро-ніки, яка дозволяє реалізувати певну функцію апаратури без застосування стандартних базових елементів на основі фізичних явищ у твердих тілах. У цьому випадку локальному об'єму твердого тіла надаються такі властивості, які потрібні для виконання певної функції. Функціональні мікросхеми можуть виконуватися на основі не тільки напівпровідників, а й таких матеріалів, як надпровідники, сегнетоелектрики, фотоматеріали та ін. Для перероблення інформації можна використовувати явища, які не пов'язані з електропровідністю (наприклад, оптичні та магнітні явища в діелектриках, поширення ультразвуку та ін.).

6.2 Хемотроніка

Хемотроніка (іоніка) - розділ електроніки, змістом якого є теорія і практика електрохімічних перетворювачів для нових типів керуючих, інформаційних,

обчислювальних і вимірювальних пристроїв. Першими електрохімічними приладами були гальванічні елементи й акумулятори, а потім електролітичні конденсатори, але усі вони звичайно не розглядаються в хемотроніці.

На початку розвитку хемотроніки були створені прилади, що є аналогами діодів і тріодів, але в них рухливими носіями заряду були іони в рідких електролітах, а не електрони. На основі цих приладів удалося здійснити випрямлення і посилення. Оскільки маса іонів у багато разів більше, а рухливість у багато разів менше, ніж маса і рухливість електронів, прилади хемотроніки дуже інерційні і придатні тільки для дуже низьких частот. Ця їх властивість є істотним недоліком. Але варто мати на увазі, що в багатьох системах, наприклад, пристроях автоматики, процеси проходять порівняно повільно, й у цих випадках низькочастотність приладів хемотроніки не має значення.

Є багато різних приладів хемотроніки. Теорія таких приладів складна, тому що в них проходять дуже складні фізико-хімічні процеси. Далі будуть розглянуті найбільш типові прилади хемотроніки. Як правило, вони мають герметичний корпус, у якому є електроліт і електроди. Матеріали деяких електродів і корпуси не повинні вступати в хімічну взаємодію з електролітом. Значна частина приладів хемотроніки - це концентраційні електрохімічні перетворювачі або перетворювачі дифузійного типу. Робота цих приладів ґрунтується на зміні концентрації активних компонентів електроліту. Ці компоненти містяться в електроліті в двох видах: окисленому і відновленому. Крім того, в електроліті є ще і пасивний (індиферентний) компонент, що не бере участі в хімічних реакціях, а лише збільшує провідність електроліту. Розподіл активних компонентів залежить від декількох процесів, що проходять в електроліті: дифузії, конвекції та міграції.

Дифузія - це поширення іонів унаслідок різниці концентрацій. **Конвекція** - переміщення самого розчину за рахунок різниці густини. **Міграція** (аналог дрейфу носіїв заряду) - переміщення іонів під дією електричного поля або поля, створеного різницею потенціалів на електродах. Головну роль звичайно відіграє дифузія.

Найпростіший електрохімічний прилад - симетрична плоска електрохімічна комірка (рис. 6.1), має електроди однакової площі з того самого матеріалу. Вольт-амперна характеристика такої комірки також симетрична. У несиметричній комірці площі електродів різні і вольт-амперна характеристика несиметрична, а

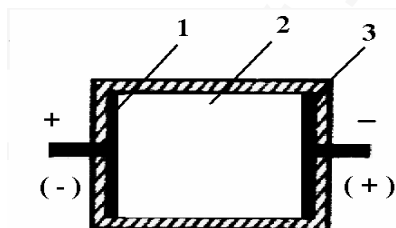


Рисунок 6.1 - Найпростіша електрохімічна комірка

отже, така комірка має випрямні властивості. Можна одержати випрямний ефект і при однаковій площі електродів, якщо поділити весь обсяг електроліту на дві нерівні частини за допомогою дифузійного бар'єра. Таким бар'єром може бути пориста або суцільна перегородка з тонкою щілиною або капіляром, що з'єднує відсіки.

Електрохімічні діоди мають відношення площ електродів до декількох сотень і такого ж порядку коефіцієнт випрямлення. На відміну від напівпровідникових електрохімічні діоди працюють уже при дуже низьких напругах від 0,005 до 0,050 В, можуть бути дуже малих розмірів, мають низький рівень власних шумів, прості у виготовленні, дешеві і мають високу надійність. Звичайно, вони придатні тільки для низьких та інфранизьких частот.

Хемотронні діоди з дифузійним бар'єром можуть застосовуватися як інтегратори струму, тобто лічильників кількості електрики. При протіканні струму змінюється концентрація компонентів електроліту і його колір. Тому можливе візуальне визначення кількості електрики, але погрішність складе не менше 10%. Якщо в діод увести додатковий електрод, то можна кількість електрики визначити за струмом в ланцюзі додаткового електрода. В електрохімічних датчиках тиску є три чи чотири електроди і частину

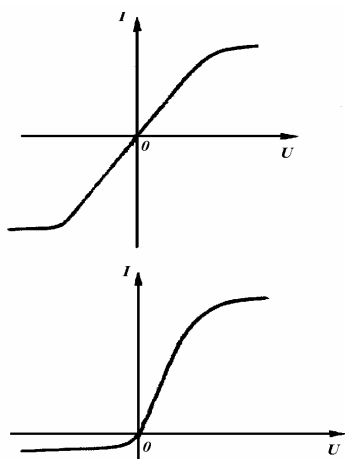


Рисунок 6.2 - Вольтамперні характеристики симетричної та несиметричної електрохімічних комірок

корпусу роблять у вигляді гнучкої мембрани. Зовнішній тиск передається через мембрану на електроліт, що починає рухатися, і тоді на один з електродів потрапляє більше іонів. Струм цього електрода зростає, і за ним можна робити висновок про тиск. Такі датчики застосовуються тільки для вимірювання змінного тиску. Подібно такому датчику працюють електрохімічні мікрофони, зокрема застосовувані для підвідного акустичного зв'язку - гідрофони.

Велику групу приладів хемотроники складають **електрокінетичні перетворювачі**. Вони базуються на використанні електрокінетичного руху. Це рух позитивних або негативних частинок рідкої речовини під дією електричного поля. Як уже зазначалося, рух іонів під дією поля називається міграцією. Рух в електричному полі більших частинок, ніж іони, має назву електрофорез. Рух рідини через пористу перегородку чи капіляр під дією поля - електроосмос. Робота електрохімічного приладу на основі електрофорезу або електроосмосу називається насосним режимом. Але можливий і інший - генераторний режим. Він полягає в тому, що під дією тиску рідина проходить через пористу перегородку і тоді між протилежними сторонами перегородки виникає різниця потенціалів. Принцип роботи електрокінетичного приладу в генераторному режимі пояснений на рисунку 6.3. Пориста перегородка, на якій із двох боків є електроди 1 і 7 у вигляді металевих сіток, поділяє прилад на дві камери 3 і 6, заповнені електролітом. Зовнішній тиск може бути переданий на електроліт через гнучкі мембрани 4 і 5. Тиск на одну з мембран викликає проштовхування рідини через пористу перегородку, і тоді на електродах з'являється різниця потенціалів. Подібний прилад служить для вимірювання змінного тиску, і на його основі можуть бути побудовані електрокінетичні мікрофони, гідрофони, віброметри, тобто прилади для вимірювання змінних переміщень (вібрацій) та акселерометри - прилади для вимірювання прискорень. Діапазон робочих частот у подібних приладів складає величину від 0,1 до 10^5 Гц.

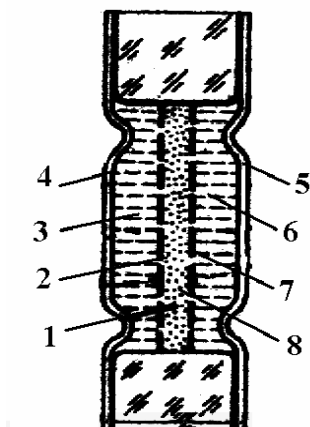


Рисунок 6.3 - Схема будови електрокінетичної комірки

Цікавими електрохімічними приладами для накопичення електричного заряду є **іонікси (іоністори)**. Вони еквівалентні конденсаторам надвеликої ємності. Будова іонікса схематично показана на рисунку 6.4. Срібний і вугільний електроди розділені твердим електролітом, таким, як рубідій - іодид срібла $RbAg_4I_5$ або сульфід - іодид срібла Ag_3SI . При протіканні струму на поверхні вугільного електрода, що є анодом, утвориться под-

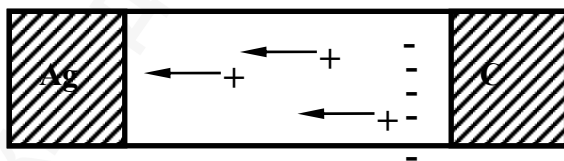


Рисунок 6.4 - Принцип будови іонікса
війний електричний шар, аналогічний системі двох різнойменних зарядів у конденсаторі, питома ємність у іоніксів може досягати 10 Ф/см^2 , тобто на три порядки вище, ніж в оксидних (електролітичних) конденсаторів.

Іонікси можуть зберігати заряд один- два роки зі зменшенням його усього лише на 3 - 5 %. Основним недоліком іоніксів є низька робоча напруга, не більше 0,5 В. Крім того, це інфранизькочастотні прилади, тому що вже при частоті 20 Гц їх ємність зменшується в 100 разів. Інтервал робочих температур в них від - 60 до +175 °С.

Для більш високих напруг іонікси з'єднують послідовно. Наприклад, для одержання ємності 5 Ф при робочій напрузі 5 В треба з'єднати послідовно 10 іоніксів ємністю по 50 Ф. Така батарея іоніксів може використовуватися як джерело струму і давати, наприклад, струм 1 мА протягом 5000 с при зниженні напруги від 5 до 4 В.

Особлива група електрохімічних приладів - *візуальні електрохімічні індикатори*. У найпростішому випадку - це два електроди в електроліті в невеликому скляному балончику. Електроліт застосовують такий, щоб він змінював свій колір при подачі напруги на електроди. Напруга, яка подається, може бути постійною, змінною або імпульсною, але обов'язково низькою. На їх основі створюють матричні індикаторні панелі. В них розміщуються дві взаємно перпендикулярні системи електродів - кожна у вигляді паралельних металевих смуг. Подача напруги та ту чи іншу пару електродів (смуг) викликає зміну кольору електроліту. Основні переваги електрохімічних індикаторів: низький рівень керуючих сигналів, мала потужність (100 мВт - 100 мкВт), великий динамічний діапазон (до 80 дБ), великий ресурс роботи (до 90000 годин), можливість роботи на низьких та інфранизьких частотах. Існують різні типи електро-хімічних індикаторів, робота яких ґрунтується на тих чи інших фізико-хімічних процесах в електролітах.

6.3 Магнітоелектроніка

6.3.1 Загальна характеристика

Магнітоелектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, що ґрунтуються на явищах електромагнетизму та магнітної індукції, таких, як намагнічування, перемагнічування, розмагнічування осердь імпульсним або безперервним струмом, виникнення ЕРС в провіднику, який рухається, під дією магнітного поля. Магнітоелектроніка пов'язана з появою нових магнітних матеріалів, які мають малу намагніченість насичення, та з розробленням технологічних методів одержання тонких магнітних плівок. На перемагнічування тонкоплівкового елемента, товщина якого не перевищує товщини одного домену, потрібні енергія, яка в 10-20 разів менша, та час, в 10-30 разів менший, ніж на перемагнічування феритового осердя. Найбільш цікавими є тонкоплівкові металеві магнітні матеріали в мікроелектронних запам'ятовувальних пристроях (ЗП), де як елементи пам'яті застосовують магнітні плівки. На тонких плівках можуть бути виконані не тільки елементи пам'яті ЕОМ, а й логічні мікросхеми та магнітні підсилювачі.

Досить широкі перспективи побудови функціональних приладів відкривають нові матеріали - магнітні напівпровідники. До них відносять магнетики, які не мають металевої природи електропровідності та являють собою з'єднання магнітних та немагнітних елементів (халькогеніди європія, халькогенідні шпінелі хрому, сильнолеговані ферити).

Розрізнять декілька груп сучасних магнітних елементів: циліндричні магнітні домени; перетворювачі Холла; магніторезистори; магніодіоди; магніто-транзистори та магнітотиристри.

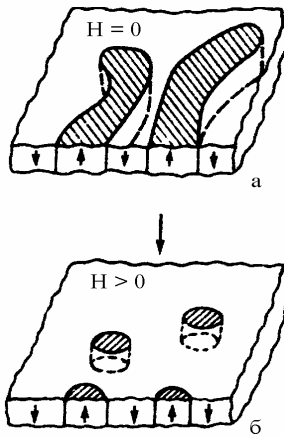
6.3.2 Циліндричні магнітні домени

Для створення магнітних елементів у мікроелектроніці застосовують магнітні плівки товщиною від 0,1 мкм до 10 мкм, які наносяться на підкладку. Важлива властивість магнітних елементів полягає в тому, що в них процеси намагнічування, перемагнічування та розмагнічування проходять набагато швидше, ніж в елементах із звичайними осердями.

Магнітні плівки мають доменну структуру, тобто складаються із окремих мікроскопічних областей - доменів із спонтанним намагнічуванням. У межах окремого домену атоми намагнічені в одному напрямку, тому кожен домен можна розглядати як окремий елементарний невеликий магніт. По товщині магнітної плівки розміщений один шар доменів. Тому зміна доменної структури може відбуватися лише повздовж поверхні плівки. Вектор поля доменів перпендикулярний до цієї поверхні. Домени мають різні розміри, різну форму та різний напрямок вектора магнітної індукції. Якщо на магнітну плівку діє зовнішнє магнітне поле, вектор якого спрямований перпендикулярно до поверхні плівки, то домени з вектором поля того самого напрямку збільшуються у розмірах, а домени з протилежним напрямком вектора поля зменшуються і при деякому значенні напруженості зовнішнього поля перетворюються в циліндричні магнітні домени (ЦМД). Діаметр ЦМД складає 1 - 5 мкм. При більш сильному магнітному полі домени зникають. Циліндричні магнітні домени можна створювати за допомогою генератора доменів у вигляді дрової петлі із струмом (рис. 6.7). Така петля з тонкої металевої плівки наноситься на поверхню основної магнітної плівки. Якщо основна плівка пронизана зовнішнім магнітним полем, а через петлю генератора доменів пропускається імпульс струму, який створює магнітне поле з протилежно направленим вектором індукції, то в магнітній плівці створюється ЦМД.

У запам'ятовувальних пристроях наявність ЦМД відповідає цифрі 1, а відсутність - цифрі 0. Домени - це стійкі утворення, і для запису двійкової інформації їх можна переміщувати в будь-якому напрямку, віддаляючи від генератора доменів, щоб останній при появі на ньому нових імпульсів струму, які відповідають цифрі 1, міг створювати нові домени. Таким чином, на відміну від системи запису інформації на магнітній плівці, яка рухається в даній системі, ЦМД, які несуть інформацію, самі рухаються по нерухомій плівці.

Зчитування інформації проводиться різними методами. Наприклад, на основну плівку наноситься петля з напівпровідника, який має магніторезистивний ефект (ефект Гауса) - зміну магнітного опору під дією



Рису

нок 6.6 - Схема утворення ЦМД: а - домени за відсутності магнітного поля, б - ЦМД, які утворилися під дією зовнішнього магнітного поля

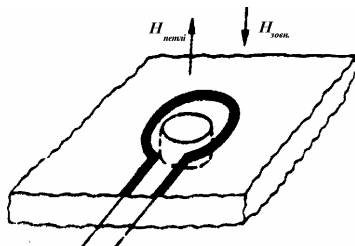


Рисунок 6.7 -
Генератор доменів

змінного магнітного поля (рис. 6.8). Через петлю пропускають постійний струм. Якщо під петлею проходить ЦМД, то магнітне поле в петлі змінюється. Тоді змінюється опір петлі і струм в ній, що відповідає цифрі 1. Постійний струм в петлі струму в петлі означає цифру 0.

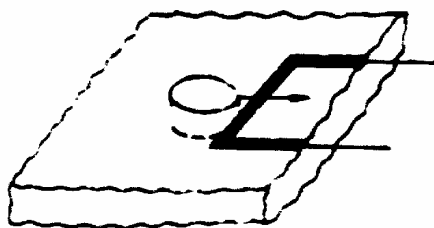


Рисунок 6.8 -
Магніторезистивна
петля для зчитування
інформації

Циліндричні магнітні домени можуть успішно застосовуватися не тільки в запам'ятовувальних пристроях, але й у різних логічних і інших елементах ЕОМ.

6.3.3 Перетворювачі Холла

Останніми роками значний розвиток одержала напівпровідникова магнітоелектроніка, що ґрунтується на гальвано-магнітних явищах. Ці явища являють собою результат впливу магнітного поля на електричні властивості напівпровідників, якими проходить електричний струм.

Найважливіше з гальваноманітних явищ - *ефект Холла*. Він полягає у тому, що при проходженні струму в напівпровіднику виникає попе-речна різниця потенціалів, якщо на цей напівпровідник діє магнітне поле, вектор якого перпендикулярний до напрямку струму. На рухливі носії заряду в магнітному полі діє сила Лоренца, що викликає їх відхилення. Розглянемо це явище в напівпровіднику n-типу (рис. 6.9). Зазначене нижче про електрони можна повторити і для дірок. Електрони під дією сили Лоренца відхиляються

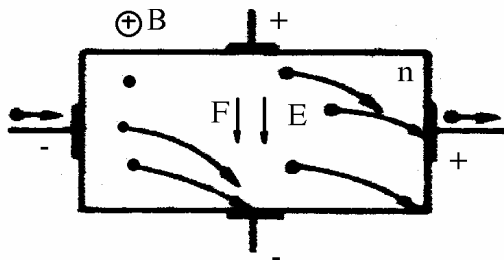


Рисунок 6.9 - Вплив ефекту Холла на траєкторії електронів у напівпровіднику n-типу

до однієї з граней напівпровідникової пластинки. На цій грані виникає негативний заряд, а на протилежній грані, відквіля рухаються електрони, - позитивний. Між електродами на цих гранях утворюється різниця потенціалів і електричне поле, що протидіє зсуву електронів під дією сили Лоренца. Коли сила, що діє на електрон з боку поля, стає такою, що дорівнює силі Лоренца, подальший зсув електронів припиняється і настає рівноважний стан. Сила поля дорівнює e , а сила Лоренца $e\nu$, де E - напруженість поля; ν - швидкість поступального руху електронів. Ці сили однакові, тоді

$$E = v \cdot B. (6.1)$$

Тому що $E = U_H/d$, де U_H - напруга Холла між електродами на гранях; d - відстань між гранями, одержимо

$$U_H = d \cdot v \cdot B. (6.2)$$

Таким чином, впливає лінійна залежність між напругою, що виникає при ефекті Холла, і магнітною індукцією, що викликає ця напруга. Тому зручно використувувати ефект Холла для побудови приладів, що вимірюють магнітну індукцію. Такі прилади одержали назву перетворювачів Холла або датчиків Холла. Їх широко застосовують для різних вимірів. Оскільки магнітне поле може бути створено електричним струмом і в цьому випадку магнітна індукція пропорційна силі струму, то на основі ефекту Холла створені безконтактні вимірники сили струму. Це особливо важливо для вимірювання сильних постійних струмів, що проходять по проводах великого діаметра, що практично неможливо розривати для включення амперметра. Перетворювачі Холла застосовуються і для багатьох інших цілей, наприклад, для вимірювання електричної потужності і таких неелектричних величин, як тиск, переміщення, кут та інші. За допомогою ефекту Холла можливе вимірювання рухливості та концентрації носіїв заряду в напівпровідниках.

Найважливіший параметр перетворювачів Холла - магнітна чутливість, яка являє собою фізичну величину, що чисельно дорівнює відношенню напруги, яка виникає, до величини магнітної індукції.

6.3.4 Магніторезистори

Магніторезистори - це напівпровідникові резистори, в яких електричний опір залежить від діючого на резистор магнітного поля. Зміна електричного опору під

дією поперечного магнітного поля називають *магніторезистивним ефектом*. Цей ефект полягає у такому. Якби усі електрони мали однакову середню швидкість, то при рівності сили поля і сили Лоренца вони рухалися б так, начебто магнітного поля взагалі немає. Але в дійсності швидкості у електронів різні. Тому для електронів, швидкість яких відрізняється від середньої, немає рівності сили поля і сили Лоренца. Одна з цих сил більша за іншу і викликає відхилення електронів. Траєкторії таких електронів викривляються і шлях електронів стає довшим, а це означає, що збільшується опір напівпровідника. При збільшенні магнітної індукції від 0 до 1 Тл опір магніторезисторів може збільшитися у кілька разів.

Основними параметрами магніторезисторів є: номінальний опір за відсутності магнітного поля, температурний коефіцієнт опору, максимально припустима потужність розсіювання.

Магніторезистори застосовуються у вимірювальній техніці (для вимірювання величини магнітної індукції) як безконтактні датчики переміщень, у безконтактних вимикачах і перемикачах, а також пристроях електро-ніки й електротехніки.

6.3.5 Магнітодіоди

Магнітодіоди - це напівпровідникові діоди, в яких вольт-амперна характеристика змінюється під дією магнітного поля. У звичайних напівпровідникових діодів тонка база і магнітне поле незначно змінюють вольт-амперну характеристику. Магнітодіоди мають товсту («довгу») базу, у якій довжина шляху струму набагато більша за дифузійну довжину інжектованих у базу носіїв. Звичайно товщина бази складає кілька міліметрів. У цьому випадку опір бази порівняний із прямим опором р-n-

переходу. При збільшенні індукції поперечного магнітного поля опір бази значно зростає подібно до того, як це відбувається в магніторезисторі. Зростає загальний опір діода, прямий струм зменшується. Таке зменшення струму пов'язане ще і з тим, що при збільшенні опорів бази відбувається перерозподіл напруги, тобто збільшується спадання напруги на базі, а відповідно зменшення напруги на р - n-переході, від чого додатково знижується струм. Такий магнітодіодний ефект наочно показує вольт-амперні характеристики магнітодіодів (рис. 6.10). З них добре видно, що з підвищенням магнітної індукції прямий струм зменшується. Слід зазначити, що для магнітодіодів характерна значно більша пряма напруга, ніж для звичайних діодів, що визначається великим опором бази. Чутливість до зміни магнітної індукції в магнітодіодів вища, ніж у перетворювачів Холла.

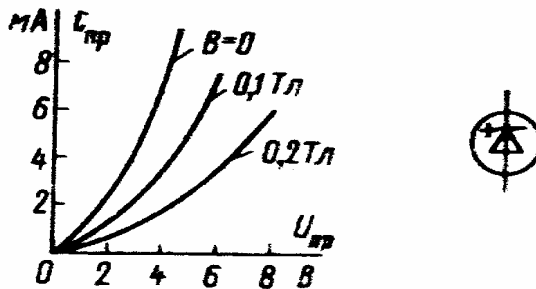


Рисунок 6.10 - Вольт-амперні характеристики та умовне позначення магнітодіода

Магнітодіоди широко застосовуються: у безконтактних кнопках і клавішах, що служать для введення інформації; як датчики положення предметів, що рухаються, для зчитування магнітного запису інформації;

для вимірювання і контролю неелектричних величин. На магнітодіодах конструюють безконтактні реле струму. Схема на магнітодіодах може замінювати колектор в електродвигуні постійного струму. У магнітодіодних підсилювачах входом є обмотка електро-магніту, магнітне поле якого керує магнітодіодом, а виходом є ланцюг самого діода. Для струмів до 10 А можна одержати коефіцієнт підсилення в кілька сотень.

6.3.6 Магнітотранзистори і магніотиристри

Магнітотранзистори - це транзистори, в яких характеристики та параметри змінюються під впливом магнітного поля. На звичайні біполярні транзистори магнітне поле діє слабше. Для значного збільшення магнітної чутливості виготовляють біполярні магнітотранзистори з двома колекторами (рис. 6.11). Як бачимо з рисунка, колектори K_1 і K_2 розміщені симетрично відносно емітера. За відсутності магнітного поля струм колектора поділяють на дві рівні частини, які потрапляють на колектори. Траєкторії електронів для цього випадку зображені суцільними лініями. На резисторах навантаження при цьому дорівнюють падінню напруги, та вихідна напруга U між колекторами дорівнює 0, оскільки потенціали колекторів однакові. Якщо на транзистор буде діяти поперечне магнітне поле (вектор магнітної індукції B такого поля спрямований перпендикулярно до площини креслення), то під впливом сили Лоренца електрони колекторного струму будуть відхилятися. Їхні траєкторії показані штрихованими лініями. На колектор K_1 буде потрапляти більше електронів, і його струм збільшиться, а струм колектора K_2 відповідно зменшиться. Спадання напруги на резисторах навантаження і потенціали колекторів стануть різними. Вихідна напруга між колекторами збільшиться зі збільшенням магнітної індукції.

Магнітна чутливість такого транзистора значно вища, ніж у перетворювачів Холла.

Існує кілька видів біполярних магнітотранзисторів: двоколекторні (були розглянуті вище), одноперехідні (двобазові) та польові.

Становлять інтерес магнітотриристи, в яких напругу ввімкнення можна змінювати, впливаючи зовнішнім магнітним полем. За відсутності магнітного поля

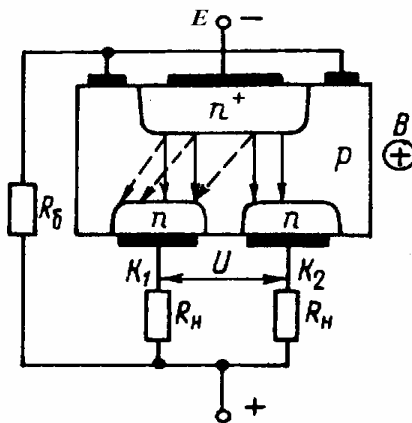


Рисунок 6.12 - Принцип будови та схема ввімкнення біполярного магнітотранзистора з двома колекторами

магнітотриристи мають деяку середню напругу ввімкнення. Збільшуючи напруженість магнітного поля в одному напрямку, можна підвищити напругу ввімкнення, а в протилежному напрямку - знизити.

6.4 Акустоелектроніка

Акустоелектроніка - галузь електроніки, яка присвячена теорії і практиці створення пристроїв, заснованих на акустоелектронній взаємодії, які служать

для перетворення та обробки сигналів. Це можуть бути перетворення тимчасові (затримка сигналів, вимірювання їх тривалості), частотні та фазові (перетворення частоти і спектра, фазовий зсув), амплітудні (підсилення та модуляція), складні (кодування та інтегрування). Усі ці види перетворень використовуються в радіолокації, далекому зв'язку, автоматичному управлінні, обчислювальній техніці та ряді інших галузей електроніки.

Виникнення в металі чи напівпровіднику струму або електрорухомої сили під дією ультразвукових хвиль називають *акустоелектричним ефектом*. Акустоелектричний ефект викликається дією або об'ємних ультразвукових хвиль в товщі звукопровода, або поверхневих акустичних хвиль - пружних хвиль, які поширюються по вільній поверхні твердого тіла або вздовж границі твердого тіла з другим середовищем, та згасають при віддаленні від межі. Останнім часом широко застосовуються акустоелектронні прилади на поверхневих акустичних хвилях: лінії затримки, смугові фільтри, резонатори, датчики. Принцип дії таких приладів показано на рисунку 6.13. Як звукопровід 1 застосовують пластину, стрижень або провід з п'єзоелектричного матеріалу (ніобат літію LiNbO_3 , п'єзокварц SiO_2 , германат вісмуту $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, п'єзокераміка та ін.) з полірованою поверхнею, на якій розміщені електромеханічні перетворювачі: вхідний 2 і вихідний 3. Такі перетворювачі називають зустрічно-штирьовими (ЗШП) та виконуються у вигляді гребінчастих електродів з тонкої металевої плівки (0,1 - 0,5 мкм).

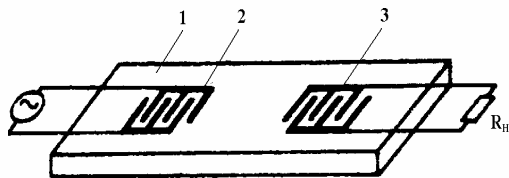


Рисунок 6.13 - Принцип будови акустoeлектронного приладу на поверхневих акустичних хвилях

До вхідного ЗШП під'єднане джерело електричного сигналу, і в звукопроводі виникає поверхнева акустична хвиля. А у вихідному перетворювачі, до якого під'єднане навантаження, виникає електричний сигнал.

Основними параметрами перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях є: внесене загасання, вхідний та вихідний опір, частотна вибірковість, смуга частот, що пропускаються. Усі ці параметри залежать головним чином від пристрою ЗШП. Звичайний ЗШП не є односпрямованим. У приладі, зображеному на рисунку 6.13, тільки 50% енергії, випромінюваної вхідним ЗШП, йде до вихідного ЗШП. Інша енергія, що йде в інших напрямках, губиться. Інакше кажучи, розглянутий найпростіший акустoeлектронний прилад вносить велике загасання. Тому важливою проблемою при створенні високоефективних акустoeлектронних компонентів є зменшення внесеного загасання шляхом раціонального конструювання ЗШП. Необхідно також, щоб перетворення електричних сигналів в акустичні і навпаки відбувалося в даній смузі частот. Це особливо важливо для смугових фільтрів і широкосмугових ліній затримки.

Геометричні розміри і форма вхідного ЗШП визначають ефективність перетворення електричного сигналу в акустичну хвилю. Для кожної частоти найбільш ефективно перетворення отримується при визначених розмірах ЗШП. Число штирів ЗШП визначає відносну смугу частот, що пропускаються. Найширша смуга буде при ЗШП, що складається з двох штирів. Чим більше штирів, тим менша ширина смуги пропускання.

Робота перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях погіршується через вторинні явища, до яких

належить, наприклад, відображення хвиль від границь звукопроводу і від границь електродів. Це відображення є основною причиною перекручувань вихідного сигналу і погіршення параметрів приладу. Шкідливим варто також вважати пряме проходження електричного сигналу з входу на вихід і передачу сигналу об'ємною акустичною хвилею. При зниженні загасання і зменшенні відображення за рахунок особливих конструкцій ЗШП досягається односпрямована передача.

Лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях звичайно вносять загасання 0,5 - 1,5 дБ. Верхня частота, на якій працюють такі лінії, досягає 2 ГГц. Відносна смуга пропущення може бути дуже різною: від часток відсотка до 100%. Тривалість затримки в залежності від відстані між ЗШП і від конструкції складає одиниці - сотні мікросекунд. Затримка може бути фіксованою чи регульованою. На торці звукопроводу звичайно наносять звуковбирні покриття, щоб зменшити відображення хвиль.

Динамічний діапазон ліній затримки 80 - 120 дБ. Для гарної роботи лінії затримки важлива температурна стабільність її параметрів. Температурний коефіцієнт затримки (ТКЗ) близький до нуля, одержують або застосовуючи спеціальний матеріал для звукопроводу (наприклад, Si з домішкою P), або роблячи звукопровід із двох частин, що мають ТКЗ різного знака, що створює взаємну компенсацію. Діапазон робочих температур ліній затримки складає десятки градусів. Для збільшення часу затримки шлях хвилі роблять у вигляді спіралі чи ламаної лінії або з'єднують послідовно кілька ліній затримки.

6.5 Кріогенна електроніка

Кріогенна електроніка (кріотроніка) - галузь електроніки, що займається питаннями застосування електронних явищ, що відбуваються в різних речовинах при

низьких температурах. Розвиток кріоелектроніки пов'язаний головним чином з тим, що при температурах, нижчих за визначену (критичну), у деяких речовинах спостерігається явище надпровідності, тобто їхній елект-ричний опір практично стає таким, що дорівнює нулю. Явище надпровідності було відкрито у 1911 р. голланд-ським фізиком Х. Камерлінг-Оннесом. Теоретичне пояснення цього явища на основі квантової фізики дали вперше в 1957 р. американські вчені Д. Бардін, Л. Купер, Д. Шриффер та радянський академік Н. Н. Боголюбов. Перехід від кінцевого значення опору до надпровідності відбувається стрибком при критичній температурі. Але стан надпровідності зникає при дії на надпровідник магнітного поля визначеної напруженості або коли сила струму в надпровіднику перевищує деяке максимальне значення.

Найпростіший, історично перший кріогенний пере-микальний прилад - **кріотрон**, являє собою надпровід-ник 1 (рис. 6.14), який можна переводити зі стану з нульовим опором у стан з кінцевим опором, впливаючи на нього магнітним полем. Поле створюється струмом, що проходить в іншому, керуючому, надпровіднику 2, який виготовляють з металу з більш високою критич-ною температурою, ніж у керованого провідника 1. Більш досконалим є плівковий кріотрон (рис. 6.15), у якому перпендикулярно один до одного розміщені ке-рована 1 і керуюча 2 плівки, розділені шаром діелект-рика 3. Товщина плівок $d \sim 1$ мкм, ширина - $x \sim 10$ мм. Керуюча плівка робиться більш вузькою. Обидві плівки

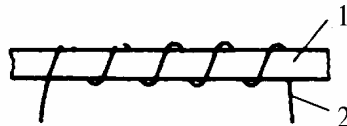


Рисунок 6.14 - Дротовий кріотрон

перебувають у надпровідному стані, але якщо пропустити через керуючу плівку струм, не менший від деякого критичного значення, то магнітне поле цього струму порушить надпровідність керованої плівки на ділянці перетинання плівок, і тоді опір керованої плівки стане більше нуля. Можливі й інші конфігурації кріотронів.

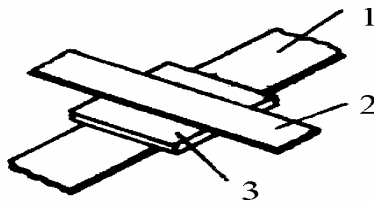


Рисунок 6.15 - Плівковий кріотрон

Основне застосування кріотронів - це перемикальні елементи швидкодіючі ЕОМ. Два різко різних стани керованого провідника відповідають знакам 0 і 1. Час перемикання (переходу кріотрона з одного стану в інший) складає малі частки мікросекунди. Тому швидкодія ЕОМ на кріотронах дуже висока. Важливо також, що на керування кріотроном витрачається дуже мала потужність. Плівкові кріотрони можуть бути зроблені дуже малого розміру, і тоді на площі в 2 см^2 розміщаються тисячі кріотронів. Саме плівкові кріотрони можливо застосовувати в мікроелектронних пристроях.

На велику увагу заслуговує отримання в замкненому надпровідному контурі постійного струму, що може тривалий час протікати за відсутності джерела ЕРС. Такий струм можна, наприклад, збудити методом електромагнітної індукції в металевому кільці, що перебуває у надпровідному стані. Унаслідок того, що опір

надпровідного кільця та втрати на нагрівання дорівнюють нулю, струм у кільці існує багато годин і навіть днів практично без послаблення. На використанні цього явища ґрунтується робота запам'ято-вувальних пристроїв, у яких відсутність струму відповідає нулю, а наявність струму - одиниці. Можна також для запам'ятовування знаків 0 і 1 використовувати у надпровідному замкненому контурі струми різних напрямків.

Особливий інтерес викликають кріогенні прилади, дія яких ґрунтується на ефекті, відкритому в 1962 році англійським ученим Б. Джозефсоном. Суть ефекту Джозефсона полягає у такому. Якщо два надпровідники розділені дуже тонким (менше 1 нм) шаром діелектрика, то через цей шар може протікати постійний струм, хоча спадання напруги на цій ділянці буде дорівнює нулю. У цьому випадку через тонкий шар діелектрика протікає своєрідний тунельний струм. Під дією магнітного поля з визначеною напруженістю, якщо струм перевищить деяке граничне значення, ефект Джозефсона зникне, тобто струм узагалі припиниться. Таким чином, на ефекті Джозефсона можуть працювати кріогенні перемикальні елементи. Час перемикання джозефсонівських елементів дуже малий (до 10^{-11} с). На таких елементах можуть бути побудовані над швидкодіючі ЕОМ з малим споживанням потужності і великим числом арифметичних операцій (декілька мільярдів за секунду).

Слід відзначити, що наднизькі температури використовуються також у різних радіоелектронних пристроях для зниження втрат у них. Створено, наприклад, коливальні системи (резонатори) з надвисокою добротністю, що сягає до сотень тисяч і навіть мільйонів, коаксіальні кабелі з мізерно малим загасанням, резонансні фільтри з надвисокою вибірковою здатністю. Дуже важливо і те, що при

низьких температурах знижується рівень власних шумів. Це сприяє підвищенню чутливості радіоприймальних пристроїв і дозволяє приймати дуже слабкі сигнали, наприклад від космічних об'єктів. При звичайних температурах приймання таких сигналів вкрай утруднене, тому що вони значно слабкіше власних шумів вхідної частини радіоприймального пристрою.

Основним недоліком усіх кріогенних пристроїв є необхідність створення для їх роботи наднизьких температур. До останнього часу для цієї мети використовувався рідкий гелій, у якого температура переходу з газоподібного стану в рідкий складає 4 К. Холодильні установки для підтримки такої низької температури складні та громіздкі. Це обмежує практичне застосування кріогенної апаратури. Нові перспективи з'явилися перед кріоелектронікою у зв'язку з відкриттям високотемпературної надпровідності. У 1987 році було встановлено, що деякі речовини, зокрема металооксидні з'єднання типу кераміки, можуть ставати надпровідниками при значно більш високих температурах. Це означає, що для таких надпровідників замість дорогого рідкого гелію можна використовувати рідкий азот, у якого критична температура складає 77 К. Рідкий азот виробляється у великих кількостях і відносно дешевий. Тому в електроніці більш ефективним є використання високотемпературних надпровідників.

6.6 Діелектрична електроніка

З точки зору теорії розсіювання носіїв заряду будь-яке неметалеве тверде тіло в товстому шарі має властивості напівпровідника, в тонкому - діелектрика. Ефекти, які пов'язані з протіканням емісійних струмів у неметалевих твердих тілах, не вивчаються ні фізикою напівпровідників,

ні фізикою діелектриків. Закономірності фізичних явищ, приладові та схемні розробки на основі вищезазначених ефектів складають зміст нового розділу фізики твердого тіла і електроніки - діелектричної електроніки.

Якщо між двома металевими електродами помістити діелектричну плівку товщиною 1 - 10 мкм, то електрони, які емігрують з металу, заповнять всю товщину плівки та напруга, яка прикладається до такої системи, викличе струм у діелектрику.

До приладів діелектричної електроніки належать діоди та транзистори, які мають характеристики, аналогічні електровакуумним приладам. Їх перевагами є мікромініатюрність, мала інерційність, низький рівень шумів, мала чутливість до зміни температури і радіації.

6.7 Біоелектроніка

Біоелектроніка - це один з напрямів біоніки, який вирішує задачі електроніки на основі аналізу структури та життєдіяльності живих організмів. Біоелектроніка вивчає нервову систему людини та займається моделюванням нервових клітин (нейронів та нейронних сіток) для подальшого формування нових елементів та пристроїв обчислювальної техніки, автоматики і телемеханіки.

Дослідження нервової системи показали, що вона має ряд властивостей та переваг перед найсучаснішими обчислювальними пристроями. Основні з них: удосконалене сприймання зовнішньої інформації незалежно від форми, в якій вона надходить; висока надійність, значно вища, ніж у технічних систем; мікро-мініатюрність елементів (при кількості елементів 10^{10} - 10^{11} об'єм мозгу людини складає $1,5 \text{ дм}^3$); економічність роботи (споживання енергії мозгом людини не перевищує декількох десятків Вт); високий ступінь самоорганізації, швидке пристосування до нових ситуацій, до зміни програм діяльності.

Нервова система складається з клітин - нейронів. Нейрони (рис. 6.16), де б вони не знаходились, мають

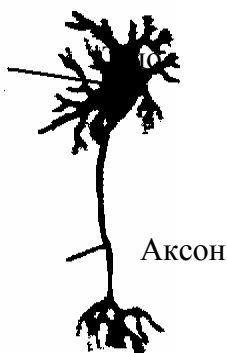


Рисунок 6.16 - Схема нейрона

однакову структуру і приблизно однакові логічні характеристики. Вони є універсальними логічними елементами. На основі нейронів будуються нейронні мережі, які свідчать про той неймовірний факт, що з допомогою одного елемента можна побудувати систему, яка може виконувати найскладніші задачі. Для реалізації складних нейронних мереж достатньо мати нейроподібний елемент, який має аналогово-логічні властивості і за своїми функціональними можливостями наближається до біологічних рецепторних і центральних нейронів. Дослідження показали, що модель нейрона може бути виконана у вигляді двох інтегральних мікросхем на МДН-транзисторах. На сучасному етапі проводяться інтенсивні наукові дослідження в різних напрямках біоелектроніки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закалик Л.У., Ткачук Р.А. Основи мікроелектроніки.- Тернопіль, 1998. - 386 с.

2. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. - Частина 1. Елементи мікроелектроніки - Київ: Вища школа, 2004. - 432 с.

3. Хоружний В.А., Письмецький В.О. Функціональна мікроелектроніка, опти- та акустоелектроніка. - Харків, 1995. - 186 с.

4. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка. - Т.1. Елементна база електронних пристроїв. - Київ: Обереги, 2000. - 300 с.

5. Стахів П.Г., Коруд В.І., Гамола О.Є. Основи електро-ніки:функціональні елементи та їх застосування. - Львів: Новий світ, 2003. - 128 с.

6. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микро-електроника. Физические и технологические основы, надежность. - Москва: Высшая школа, 1986. -465 с.

7. Жеребцов И.П. Основы электроники. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. - 242 с.

8. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. - Москва: Советское радио, 1980. - 264 с.

9. Герчановская В.П., Ипатов Э.Ф., Малова А.П. Новые профессии света. - Киев: Техника, 1989. - 120 с.

10. Носов Ю.Р., Сидоров А.С. Оптроны и их применение. - Москва: Радио и связь, 1981. - 320 с.

11. Андрущенко Л.М., Гроднев И.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические линии связи. - Москва: Радио и связь, 1984. - 260 с.

12. Лавриненко В.Ю. Справочник по полупроводниковым приборам. - Киев: Техніка, 1984. - 410 с.

13. Прохорский А.А. Основы автоматики и телемеханики. - Москва: Высшая школа, 1988. - 290 с.

14. Абрамов В.М. Электронные приборы и устройства. - Москва: Транспорт, 1989. - 110 с.

15. Александров Л.Н., Иванцев А.С. Многослойные пленочные структуры для источников света. - Новосибирск: Наука, 1981. - 130 с.

16. Агахян Т.М. Интегральные микросхемы. - Москва: Высшая школа, 1983. - 464 с.

17. Харченко В.М. Основы электроники. - Москва: Высшая школа, 1982. - 352 с.

18. Браммер Ю.А., Пащук И.Н. Импульсная техника. - Москва: Радио и связь, 1985. - 320 с.

19. Проценко І.Ю. Технологія та фізика тонких металевих плівок. - Суми: СумДУ, 2000. - 148 с.

20. Блех А., Селло Х., Грегор Л.В. Тонкие пленки в интегральных схемах // Технология тонких пленок. - Т.2

/Под ред. Л.Майссела, Р.Глэнга. - Москва: Сов. Радио, 1977. - С.724 - 753.

21. Проценко І.Е. Тонкие металлические пленки в науке и технике. - Киев: Знание, 1988. - 32 с.

22. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление: Пер. с англ. / Под ред. М.В.Гальперина. - Москва: Мир, 1985. - 504 с.