

## CONTENTS

1.1. Економічні причини та наслідки мікроелектроніки (МЕ).	4
1.2. Загальна схема виготовлення МЕ пристрою.	5
1.3. Базові процеси МЕ.	6
1.4. Визначення МЕ.	7
1.5. Класифікація інтегральних схем.	7
2.1. p-n перехід.	8
2.2. Реальний розподіл домішок з координатою.	10
2.3. Виникнення бар'єру та хід потенціалу в p-n переході.	12
2.4. Бар'єр Шотткі.	14
2.5. Вплив поверхневих станів на фізичні властивості діоду Шотткі.	16
3.1. Границя НП-діелектрик. Вплив на p-n перехід.	18
3.2. Окислення НП.	19
4.1 Легування. Дифузія.	21
Радіаційно – стимулююча дифузія.	21
4.2. 1-й та 2-й закони Фіка.	22
Перший закон Фіка	22
Другий закон Фіка.	22
4.3. Іонне легування.	23
4.4. Фізичні основи каналювання	25
4.5. Співвідношення Ейнштейна	26
5.1. Епітаксія. Основні типи епітаксії та фізичні процеси, що її обумовлюють	27
5.2. Молекулярно-променева епітаксія.	28
6.1. Фізичні принципи літографії. Типи та засоби літографії.	29
6.2. Можливості оптичної літографії.	31
6.3. Особливості рентгенівської, електронної та іонної літографії.	31
7.1.Травлення. Техніка масок. Типи травників.	33
7.2. Фізико-хімічні процеси при травленні.	35
7.3. Селективне травлення.	36
7.4. Іонне та плазмохімічне травлення.	38
8.1. Нанесення тонких плівок: термічне та катодне напилювання.	39
8.2. Іонно-плазмове напилювання.	41

8.3 Металізація та отримання діелектричних плівок у тонкоплівковій технології.....	42
9.1. Аморфні та полікремнієві плівки в мікроелектроніці.....	43
9.2. Елементи мікроелектроніки на основі аморфних речовин та полікристалів. .....	44
10.1. Способи ізоляції елементів: Ізоляція р-n переходом.....	45
10.2. Особливості ізоляції за допомогою V-каналов. ....	47
10.3. Технологія ЕПІК ізоляції.....	48
10.4. Особливості створення структур кремнію на ізоляторі. ....	49
11.1. Транзистори (паразитні, горизонтальні та вертикальні).....	50
11.2. Багатоемітерні та багатоколекторні транзистори в МЕ. Їх топологія та додаткові можливості.....	51
11.3. Польові транзистори .....	53
11.4. МДН транзистори.....	55
11.5. Паразитні ємності МДН-транзисторів. ....	58
11.6. Засоби підвищення швидкодії МДН-транзисторів. Засоби зменшення порогової напруги. ....	60
11.7. Елементи логіки на основі МДН-транзисторів. ....	61
11.8. МНОН ТРАНЗИСТОР .....	62
11.9. НЕМТ (engl.) транзистор та його конструктивні особливості. ....	63
11.10. Горизонтальні та вертикальні транзистори .....	65
12.1.-12.2. Плівкові резистори в мікроелектроніці. Питомий опір шару. Напівпровідникові резистори.....	67
12.3. Пінч резистор. Його частотні властивості.....	68
13.1. Плівкові конденсатори в мікроелектроніці. ....	69
13.2. Напівпровідникові конденсатори в мікроелектроніці.....	70
13.3. Реалізація індуктивності в мікроелектроніці. ....	71
13.4. Особливості створення тонкоплівкових та товстоплівкових пасивних елементів у МЕ .....	72
14.1. Ключі та бістабільні комірки. ....	73
14.2. Перемикачі струму.....	75
14.3.1. Диференціальний каскад = диференціальний підсилювач. ....	76

14.3.2. Коефіцієнти підсилення синфазної складової та диференціальної складових диференціального підсилювача. Коефіцієнт придушення синфазної складової.....	79
14.4. Тригер.....	82
14.5. Тригер Шмідта.....	84
14.6. Особливості ІЛЕ на біполярних та МДН транзисторах та їх використання в мікросхемах.....	86
15.1 Запам'ятовуючі пристрої, їх будова і топологія. ....	87
15.2. Будова статичних та динамічних запам'ятовуючих комірок. ....	88
16.1. ПЗЗ структури. Основні принципи будови приладів ПЗЗ. ....	89
16.2. Характерні значення часу транспортування та зберігання заряду. ....	90
16.3. Конструктивні особливості 3-фазних та 2-фазних приладів з зарядовим зв'язком. ....	91
17. Надійність інтегральних схем. Частота відмов. Ймовірність безвідмовної роботи. Крива відмов. ....	92

### 1.1. Економічні причини та наслідки мікроелектроніки (МЕ).

Груповий метод виробництва передбачає виготовлення на одній напівпровідниковій пластині великої кількості однотипних ІС та одночасну обробку десятків таких пластин. Після завершення циклу виготовлення пластини розрізаються у двох взаємно перпендикулярних напрямках на окремі кристали - чіпи (chip), кожен з яких представляє собою ІС.

Планарна (площинна) технологія - це така організація технологічного процесу, при якій всі складові ІС формуються в одній площині.

Вартість  $D$  однієї ІС(одного кристалу) спрощено можна записати за ф-лою:

$$D = \frac{1}{XY} \left\{ \frac{A+B}{Z} + C \right\},$$

Де  $A$  – витрати на науково-дослідницькі та конструкторські роботи,  $B$  – затрати на технологічне обладнання, приміщення,  $C$  – поточні витрати на матеріали, електроенергію, заробітну плату, в перерахунку на одну пластину,  $Z$  – к-сть пластин, що виробляються до амортизації основних фондів;  $X$  – к-сть кристалів на пластині,  $Y$  – відношення коректних ІС до загальної к-сті.

Збільшення  $Y$  досягається створенням більш сучасної технології виробництва. Ріст к-сті кристалів на пластині можна досягти двома способами: збільшенням розміру пластини і зменшенням розміру окремих елементів. Всі змінні в формулі не залежать одні від одних, тому аналіз на мінімум вартості насправді є складним.

ІС мають ряд особливостей, які дозволяють вважати їх якісно новим типом приладів:

- **ІС самостійно виконує закінчену функцію**, тоді як елементарні прилади виконують аналогічну функцію тільки в комбінації з іншими компонентами. Наприклад, окремий транзистор не може забезпечити підсилення сигналу. Для цього потрібно спаяти цілу схему.
- **Підвищення функціональної складності ІС в порівнянні з елементарними приладами НЕ супроводжується погіршенням якого-небудь основного показника(надійності, вартості).** Часто навпаки. Немає паяних, зварних з'єднань – використовують металізацію (зростає надійність). Всі елементи ІС виробляються за один технологічний цикл→вартість цілої ІС близька до вартості одного дискретного транзистора.
- **У МЕ надають перевагу активним елементам над пасивними**(в дискретній транз-ній техніці -навпаки. Транзистори дорогі, стараються їх використовувати якомога менше). В ІС важливою є ціна не елемента, а кристалу. Тому доцільно розміщувати на кристалі якомога більше елементів з

малою площею. Активні елементи мають мінімальну площу, а пасивні – максимальну.

- **Суміжні елементи знаходяться на відстані долей мкм один від одного.** На таких відстанях флуктуації електрофізичних властивостей малоймовірні.

## 1.2. Загальна схема виготовлення МЕ пристрою.

**Виробництво чіпів** полягає в накладенні тонких шарів зі складним "візерунком" на кремнієві підкладки. Спочатку створюється ізолюючий шар, який працює як електричний затвор. Зверху потім накладається фоторезистивний матеріал, а небажані ділянки видаляються за допомогою масок і високоінтенсивного опромінення. Коли опромінені ділянки будуть видалені, під ними відкриваються ділянки діоксиду кремнію, який видаляється з допомогою травлення. Після цього віддаляється і фоторезистивний матеріал, і ми отримуємо певну структуру на поверхні кремнію. Потім проводяться додаткові процеси фотолітографії, з різними матеріалами, поки не буде отримана бажана тривимірна структура. Кожен шар можна легувати певною речовиною або іонами, змінюючи електричні властивості. У кожному шарі створюються вікна, щоб потім підводити металеві з'єднання.

Що стосується **виробництва підкладок**, то з цілісного монокристала-циліндра їх необхідно нарізати тонкими "млинцями", щоб потім легко розрізати на окремі кристали процесорів. На кожному кроці виробництва виконується складне тестування, що дозволяє оцінити якість. Для тестів кожного кристала на підкладці використовуються електричні зонди. Нарешті, підкладка розрізається на окремі ІС, неробочі ІС відразу ж відсіваються. Усі функціональні блоки проходять через інтенсивні стрес-тести.

### 1.3. Базові процеси МЕ.

Особливістю виробів мікроелектроніки є висока степінь складності функцій, що виконуються, для чого створюються схеми, в яких кількість компонентів рахується мільйонами. Звідси зрозуміло, що забезпечити надійність функціонування при з'єднанні вручну - задача нездійсненна. Єдиним способом її вирішення є застосування якісно нових високих технологій.

Виготовлення ІС є базовим процесом і відбувається за допомогою групового методу виробництва та планарної технології.

Груповий метод полягає в тому, що, по-перше, на одній пластині напівпровідникового одночасно виготовляється велика кількість ІС; по-друге, якщо дозволяє технологічний процес, то одночасно обробляються десятки таких пластин. Після завершення циклу виготовлення ІС пластина розрізається в двох взаємно-перпендикулярних напрямках на окремі кристали, кожен з яких являє собою ІС.

Планарна технологія – це така організація технологічного процесу, коли всі елементи та їх складові утворюються в ІС шляхом їх формування через площину. Одна чи декілька технологічних операцій при виготовленні ІС полягає в з'єднанні окремих елементів в схему та приєднанні їх до спеціальних контактних площадок. Тому необхідно, щоб виводи всіх елементів і контактних площадок знаходилися в одній площині. Таку можливість забезпечує планарна технологія.

Фінальна операція – корпусування - це поміщення ІС в корпус з приєднанням контактних площадок до ніжок ІС(Рис).

Початковим етапом виготовлення напівпровідникових мікросхем являється вирощування монокристалічного злитка кремнію, що містить заздалегідь певну кількість домішкових атомів. Злитки розрізають на пластини і обробляють їх поверхні. За допомогою багаторазово повторюваних операцій окислення, фотолітографії, епітаксії, дифузії, іонної імплантації, металізації і травлення формують елементи мікросхеми, з'єднані провідними доріжками на поверхні пластини. На одній пластині може бути виготовлено велику кількість однотипних кристалів (чіпів). Потім всі кристали тестують, маркуючи дефектні, і розрізають пластину на кристали. Після цього кристали монтують у корпус і проводять заключний функціональний контроль.

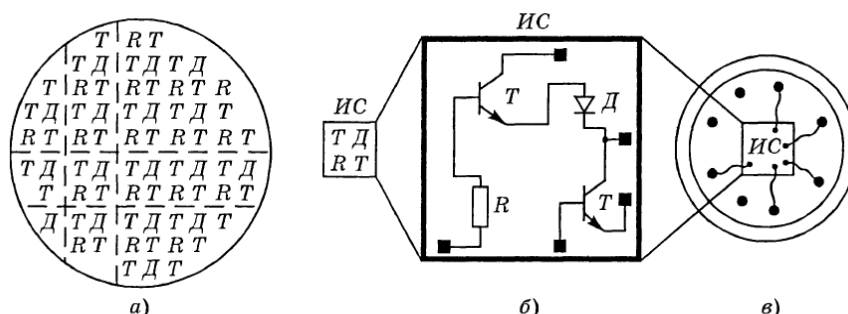


Рис. Ілюстрація виготовлення простої ІС: а – кремнієва пластина з «комплектами» із двох транзисторів, діоду та резистора; б – між з'єднання елементів в середині «комплекта» (планарна технологія); в – готова ІС в корпусі.

## 1.4. Визначення МЕ.

**Мікроелектроніка** – це розділ електроніки, задачею якого є дослідження та виробництво електронних компонент з характерними розмірами порядку кількох мікрометрів і менше (інтегральних елементів) та мікросхем на базі таких елементів (інтегральних мікросхем), а також принципів їх застосування.

Такі прилади переважно виготовляються на напівпровідниковій технології, використовуючи фотолітографію та легування. **Основні інтегральні елементи** – резистори, конденсатори, котушки, діоди, транзистори, ізолятори, провідники – використовуються в мікроелектроніці у вигляді мініатюрних приладів в інтегральному виконанні.

**Інтегральна мікросхема** – це сукупність взаємопов'язаних компонентів (транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів і т.д.), виготовлена в єдиному технологічному циклі, на одній несучій конструкції (підкладці), і виконуючі певну функцію перетворення інформації.

## 1.5. Класифікація інтегральних схем.

**Ступінь інтеграції** (за кількістю елементів на одному кристалі):

- Мала інтегральна схема (до 100 елементів)
- Середня інтегральна схема (до 1000 елементів)
- Велика інтегральна схема (до  $10^4$  елементів)
- Надвелика інтегральна схема (більш за  $10^4$  елементів)

**Технологія виготовлення:**

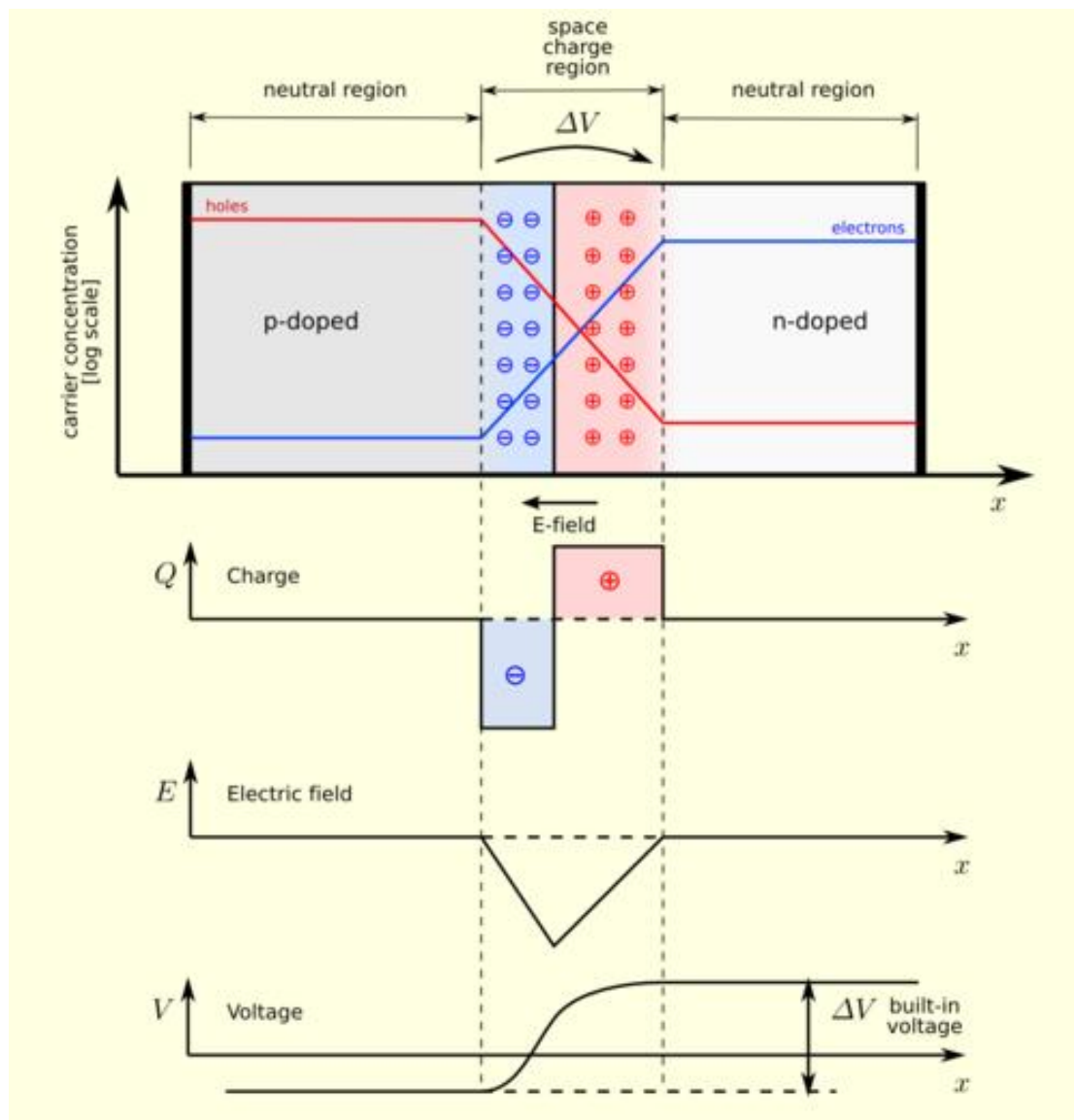
- Напівпровідникова мікросхема – всі елементи та між елементні з'єднання виконані на одному напівпровідниковому кристалі
- Плівкова інтегральна схема – всі елементи виконані у вигляді плівок. Розрізняють тонко плівкову та товсто плівкову
- Гібридна мікросхема – окрім напівпровідникових елементів містить без корпусні транзистори, діоди та інші елементи, розміщені в один корпус
- Мішана – окрім напівпровідникових містить плівкові пасивні елементи, розміщені на поверхні

**За видом обробки сигналу:**

- Аналогова
- Цифрова
- Аналого-цифрова

## 2.1. p-n перехід

-область контакту напівпровідників p- та n- типу, у якій відбувається перехід від одного типу провідності до іншого.



В напівпровіднику p-типу концентрація дірок набагато перевищує концентрацію електронів. В напівпровіднику n-типу концентрація електронів набагато перевищує концентрацію дірок. Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне дифузійний струм – носії заряду, хаотично рухаючись перетікатимуть із тієї області, де їх більше у ту область, де їх менше. При такій дифузії електрони та дірки переносять із собою заряд. Як наслідок, область на границі стане зарядженою. Та область у напівпровіднику p-типу, яка примикає до границі розділу, отримає додатковий негативний заряд, принесений електронами, а погранична область в напівпровіднику n-типу отримає позитивний заряд, принесений дірками. Таким чином, границя розділу буде оточена двома **областями просторового заряду** протилежного знаку.



Електричне поле, яке виникає внаслідок утворення областей просторового заряду, спричиняє дрейфовий струм у напрямку протилежному дифузійному струму. Врешті-решт, між дифузійним і дрейфовим струмами встановлюється динамічна рівновага і перетікання зарядів припиняється.

Якщо прикласти зовнішню напругу таким чином, щоб створене нею електричне поле було направленим в протилежному напрямку до напрямку електричного поля між областями просторового заряду, то динамічна рівновага порушується, і дифузійний струм переважає дрейфовий струм, швидко наростаючи з підвищенням напруги. Таке під'єднання напруги до *p-n* переходу називається **прямим зміщенням**.

Якщо ж зовнішня напруга прикладена так, що створене нею поле є такого ж напрямку що і поле між областями просторового заряду, то це призводить лише до збільшення областей просторового заряду, й струм через *p-n* перехід не проходить. Таке під'єднання напруги до *p-n* переходу називається **зворотним зміщенням**.

## 2.2. Реальний розподіл домішок з координатою

Для знаходження розподілу домішки, скористаємося рівнянням дифузії:

$$\frac{dn}{dt} = D \frac{d^2 n}{dx^2} \quad (0.1)$$

**Дифузія зі скінченного (обмеженого) джерела** має місце, коли граничною умовою є абсолютно непроникна поверхня. При цьому потік через поверхню  $x=0$  відсутній при всіх значеннях  $t$ , тобто  $\left. \frac{dn(x,t)}{dx} \right|_{x=0} = 0$

.При цьому початкові умови для домішкового розподілу такі:

$$n(x,0) = \begin{cases} N_s, & 0 \leq x < d, \\ 0, & x > d. \end{cases} \quad (0.2)$$

За цих умов **розв'язок рівняння** другого закону Фіка має вигляд

$$n(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp \left[ - \left( \frac{x}{2\sqrt{D t}} \right)^2 \right], \quad (0.3)$$

де  $Q$  – загальна кількість домішки в напівпровідниковій пластині у будь-який момент часу. Рівняння (0.4) є функцією розподілу (закон) Гауса і показує розподіл концентрації домішки (Рис. 1)

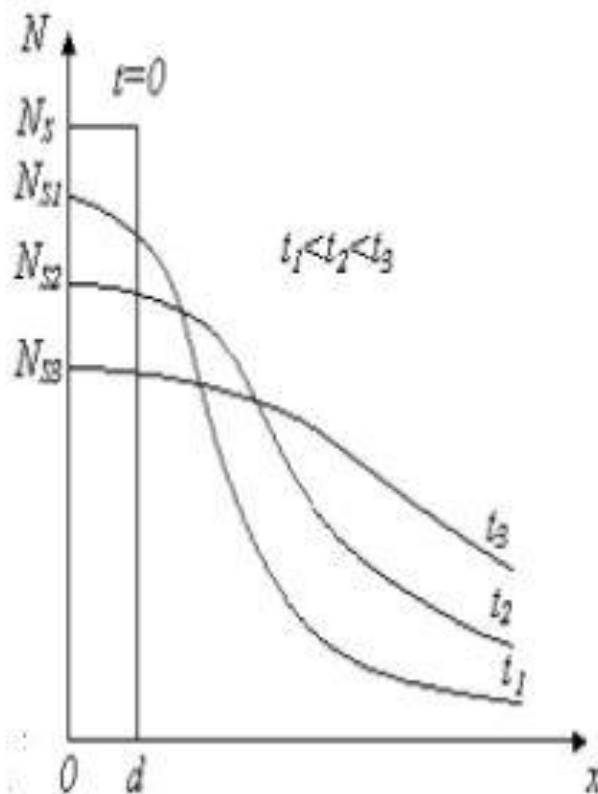


Рис.1

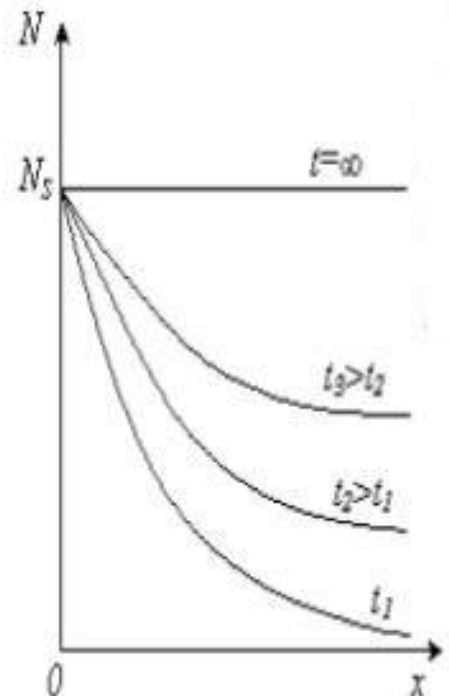


Рис.2

**Дифузія з нескінченного (постійного) джерела** домішки в напівпровідникову пластину, діаметр якої значно більший її товщини, відбувається на глибину, істотно

меншу товщини пластини. Під нескінченним (постійним) джерелом розуміють такий стан системи, коли кількість домішки, що йде з приповерхневого шару напівпровідника в його об'єм, рівна кількості домішки, що надходить в приповерхневий шар. Початкову і граничну умови в цьому випадку записують таким чином:

$$\begin{cases} N(x, 0) = 0, & x > 0, t = 0, \\ N(0, t) = N_s, & x = 0, t \geq 0, \\ N(\infty, t) = 0, & x \rightarrow \infty, t \geq 0. \end{cases}$$

де  $x$  – відстань від поверхні;  $x=0$  – координата поверхні, через яку відбувається дифузія;  $N_s$  – приповерхнева концентрація домішки, підтримувана постійною протягом всього процесу;  $N(x, t)$  – концентрація дифундуючої домішки на будь-якій глибині у будь-який час;  $t$  – час дифузії.

За цих умов **розв'язання рівняння дифузії** має вигляд:

$$N(x, t) = N_s \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x/2\sqrt{Dt}} \exp(-\lambda^2) d\lambda \right]$$

Другий член в квадратних дужках є виразом функції помилок, тому попереднє рівняння можна записати таким чином:

$$N(x, t) = N_s \left[ 1 - \operatorname{erfc}\left(x / 2\sqrt{Dt}\right) \right]$$

Розподіл показано на Рис. 2

**Радіаційно – стимулююча дифузія.** Цей метод дифузії заснований на введенні домішки в результаті бомбардування напівпровідникового кристала легкими іонами з енергією, достатньою для зсуву атомів підкладки в міжвузлові положення.

Вакансії, що утворюються, мігрують в кристалі, міняючись положенням в ґратках з сусідніми атомами, внаслідок чого домішкові атоми займають положення у вузлах кристалічних ґраток, здійснюють таку дифузію з поверхневого джерела домішки, сформованого наперед шляхом додаткового оброблення поверхні пластини іонами електрично неактивних домішок ( $H, He, N, Ar$  та ін.). Глибина проникнення домішки з поверхневого джерела залежить від тривалості бомбардування  $t$ , енергії іонів і інтенсивності опромінювання.

**Розподіл концентрації** домішок при радіаційно-стимулюючій дифузії визначається виразом  $N(x, t) = N_s \exp\left[-\frac{L_d^2}{D_0 t} \exp\left(\frac{x}{L_d}\right)\right]$

де  $N_s$  – поверхнева концентрація;  $L_d$  – дифузійна довжина пробігу дефекту;  $D_0 = N_{i0} D_n / N_m$  – коефіцієнт дифузії залежний від надмірної  $N_{i0}$  відносно термічно рівноважної  $N_m$  концентрації коефіцієнта дифузії вакансій  $D_n$ .

### 2.3. Виникнення бар'єру та хід потенціалу в р-п переході.

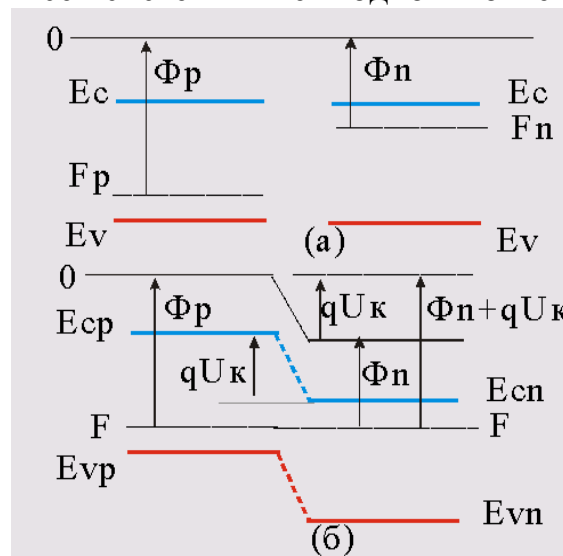
#### Возникновение потенциального барьера. Контактная разность потенциалов.

Электронно-дырочный переход - основной элемент биполярных приборов, рп - переход создают в кристалле изменением типа его проводимости, путем введения акцепторной и донорной примеси.



**Рис. 19.** Схема кристалла с резким рп переходом (вверху) и распределение акцепторной (Na) и донорной примеси в нем (Nd).

Энергетическую диаграмму для рп перехода можно получить если воспользоваться положением о том, что в системе, находящейся в равновесном состоянии, происходит выравнивание средней энергии между ее частями и, соответственно, уровень Ферми должен для всей системы иметь одно и то же значение.



**Рис. 20.** Энергетическая диаграмма: (а) изолированные р и п области, (б) рп - переход.

Предположим, что у нас имеется две изолированные полупроводниковые области р и п типов. Тогда для этих областей можно построить энергетическую диаграмму, показанную в верхней части рис. 20. Как иллюстрирует диаграмма, материал р и п типа отличается положением уровней Ферми  $F_r$  и  $F_n$  и, соответственно, работой выхода  $\Phi_r$  и  $\Phi_n$ .

Когда образуется рп переход, между р и п областями происходит обмен электронами и дырками и энергией так, что между областями устанавливается равновесие, и характеризующий равновесное состояние уровень Ферми становится единым для всей системы. Области, находящиеся на значительном удалении от места контакта р и п областей, не подвержены влиянию рп перехода. Условия сохранения свойств отдельных материалов и единства уровня Ферми для всей системы приводят к появлению скачка в области рп перехода. Этот скачок соответствует возникновению потенциального барьера, который препятствует переходу основных носителей в потенциальную область (дырок из р в п область и электронов из п в р область). Потенциальный барьер возникает в результате появления внутреннего электрического поля и соответствующей ему разности потенциалов  $U_k$ , которую принято называть контактной.

Как видно из диаграмм рис. 20:

$$qU_k = \Phi_p - \Phi_n = F_n - F_p \quad (39)$$

Т.е. **контактная разность потенциалов равна разности термодинамических работ выхода** или разности энергии уровней Ферми в материалах р и n типов. Чтобы рассчитать положение уровней Ферми, воспользуемся формулами для концентраций электронов (дырок) в n и p областях:

$$\begin{aligned} n_n &= N_c \exp -\frac{E_c - F_n}{kT}; & n_p &= N_c \exp -\frac{E_c - F_p}{kT} \\ \ln \frac{n_n}{n_p} &= \frac{-E_c + F_n - E_c - F_p}{kT} \\ qU_k = F_n - F_p &= kT \ln \frac{n_n}{n_p} & \Leftrightarrow & qU_k = F_n - F_p = kT \ln \frac{p_p}{p_n} \end{aligned}$$

Поскольку концентрация основных носителей примерно равна концентрации легирующей примеси ( $p_{p0} = N_a$ ,  $n_{n0} = N_d$ ), и произведение равновесных концентраций электронов и дырок в одной области при заданной температуре равно квадрату концентрации собственных носителей заряда (18), то из (41) получим:

$$U_k = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

Таким образом, потенциальный барьер в pn переходе тем выше, чем сильнее легированы p и n области.

## 2.4 Бар'єр Шотткі

Бар'єр Шотткі –потенційний бар'єр для електронів котрий формується на межі метал-напівпровідник(за умови того, що робота виходу метала більше за роботу виходу напівпровідника  $\varphi_m > \varphi_s$  для контакту з напівпровідником  $n$ -типу , для  $p$ -типу навпаки  $\varphi_m < \varphi_s$ , в іншому випадку бар'єру не буде – при контакті утвориться область збагачена основними носіями котра буде задавати поведінку такого інтерфейсу як омічного контакту).

Для визначенності надалі будемо розглядати бар'єр Шотткі на границі  $n$ -напівпровідника з металом робота виходу якого, вище за роботу вихода напівпровідника  $\varphi_m > \varphi_s$ .

Розглянемо принцип формування бар'єру Шотткі:

1. Припустимо, що в початковий момент часу бар'єру не було;
2. З металу в напівпровідник і з напівпровідника в метал будуть летіти електрони з-за термoeмісії;
3. Струм електронів з напівпровідника більше – бо робота виходу менше;
4. Метал заряджається негативно відносно напівпровідника, – терmostрум зупиняється з-за поля;
5. З-за цього поля на границі в доволі вузькій області є падіння потенціалу, таке, що рівні фермі металу та напівпровідника зрівняні  $E_{Fm} = E_{Fs}$  – відбувся перехід до рівноваги;

Енергетична діаграма контакту метал напівпровідник виглядає наступним чином. Де домовимось про такі означення:

$w$  – товщина області просторового заряду ОПЗ(область де є некомпенсований заряд йонізованих донорів);

$\varphi_0$  – висота потенційного бар'єру зі сторони напівпровідника;

$\xi_n$  – відстань від рівня Фермі до дна зони провідності;

$\varphi_b = \varphi_0 + \xi_n$  – висота потенційного бар'єру зі сторони металу;

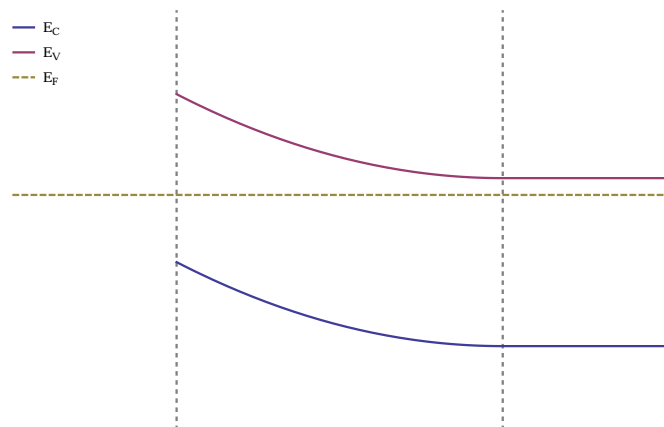


Рис. 1: Спрощена енергетична діаграма контакту метал-напівпровідник

**Заува.** Поле в металі теж не дорівнює нулю але спадає набагато швидше ніж ширина ОПЗ оскільки концентрація вільних носіїв в металі набагато вище чим в напівпровіднику.

Надалі будемо вважати додатною таку напругу, котра понижає потенційний бар'єр. Пониження потенційного бар'єру буде виникати при подаванні напруги за рахунок розриву рівня фермі в ОПЗ. Потенційний бар'єр зменшується як  $\varphi_0 - eV$ .

Як видно на рисунку зправа, товщина ОПЗ також залежить від  $V$ , точна залежність має вигляд  $w \sim \sqrt{1 - eV/\varphi_0}$ .

Перехід на основі бар'єру Шотткі має декілька основних механізмів проведення струму

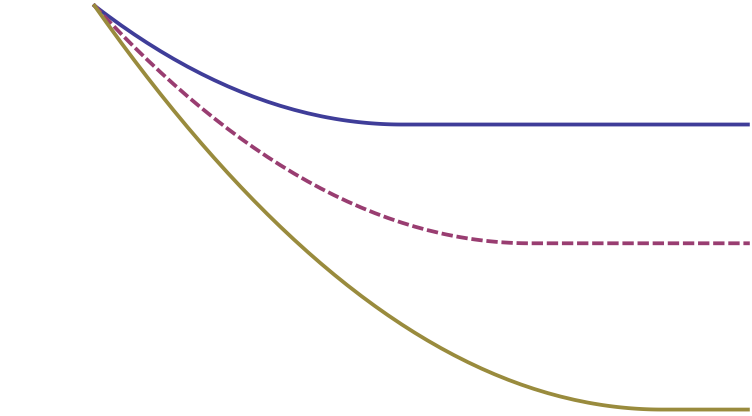


Рис. 2: Вигини зони провідності для напруг (згори донизу)  $V > 0$ ,  $V = 0$  та  $V < 0$

1. Надбар'єрний струм носіїв заряду у яких з-за температури вистачає енергії для подолання бар'єру Шотткі

$$j = A^* T^2 e^{-\frac{\varphi_b}{kT}} \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

2. Рекомбінаційни струм (рекомбінація зарядів в ОПЗ)

$$j = j_{sr} \left( e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)$$

3. Генераційний струм (генерація зарядів в ОПЗ)

$$j = j_{sg} \sqrt{1 + \frac{e|V|}{\varphi_0}}$$

Також можна говорити про ємність переходу

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{w(V)} S$$

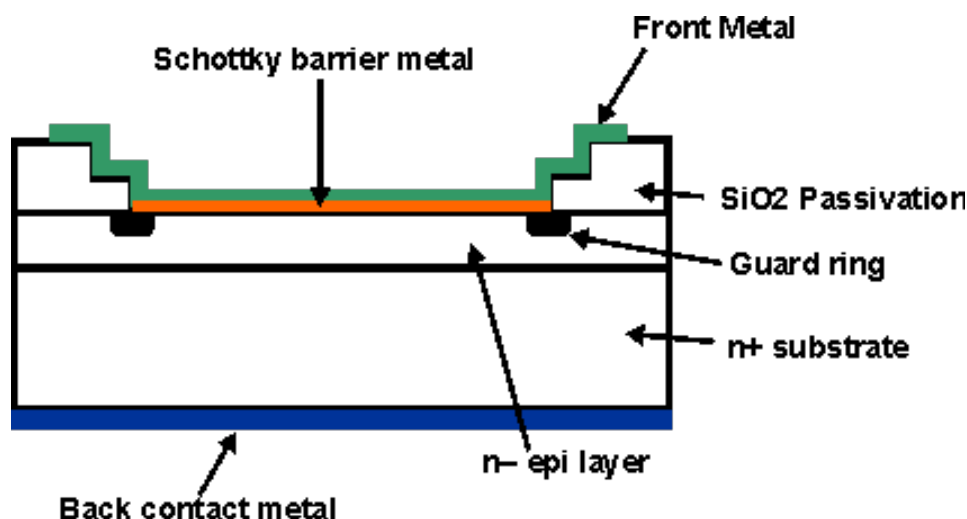
Відхилення від формул вище можуть створювати вплив опору бази та поверхневих електронних станів ПЕС.

Вплив опору бази можна зменшити збільшенням легування напівпровідникової бази, але це зменшить напругу пробою, та товщину області просторового заряду, роблячи її більш тунельно-прозорою.

ПЕС стани виникають з-за того, що ґратки металу та напівпровідника мають не тільки різні хімічні будови, а ще й різну просторову структури (тип ґратки та крок ґратки) та коефіцієнти температурного розширення, що призводить до появи обірваних зв'язків і їм подібних на поверхні.

По-друге в реальних приладах діоди шотткі потрібно ізолювати від інших приладів, що досягається наприклад ізоляцією за допомогою  $p-n$  переходу між базою діода шотткі та підкладкою.

Приклад внутрішньої будови реального діода Шотткі



база зроблена в два шари – прибор'єрний шар з меншим легуванням та шар з високим легуванням, для того, щоб зменшити внутрішній опір бази. Охоронне кільце по периметру металізації зроблене з метою щоб прибрати великі струми на перефії котрі виникають з-за крайових ефектів. Тоді як пасивація поверхні  $SiO_2$  виступає заодно вікном для металізації.

Основними характеристиками діоду з бар'єром Шотткі є

- Максимальний прямий струм (обмежується перегрівом);
- Максимальна зворотня напруга (обмежується пробоем);
- Максимальна частота роботи (обмежується бар'єрною ємністю тому, що діод працює на основних носіях);

## 2.5 Вплив поверхневих електронних станів на фізичні властивості діоду Шотткі

Поверхневі електронні стани перш за все впливають на динаміку роботи приладу, тому, що поверхневі електронні стани створюють додаткову ємність для накопичення заряду. Ця ємність не може бути заповнено швидко, оскільки поверхня знаходиться біля збідненої на рухливі носії частину напівпровідника (області просторового заряду нерухомих іонів донорів). Тому зарядовий стан не встигає за напругою на високих частотах, і вклад ємності від ПЕС прямує до нуля.



Тому достатньо розглядати вплив ПЕС тільки на низьких частотах на вольт-фарадну характеристику. Тоді можна стверджувати, що оскільки наявні додаткові електронні стани котрі можна зрядити сумарна ємність системи зростає, і тому ємність системи з ПЕС буде завжди лежати над ідеальною. Величина поправки залежить від щільності ПЕС біля положення рівня Фермі – чим більша щільність, тим більше ємність поверхневих станів.

### 3.1. Границя НП-діелектрик. Вплив на p-n перехід

**Приповерхневий шар** напівпровідника це особлива область. Вона має кристалічну структуру, адсорбовані домішки, характерні наявністю особливих енергетичних рівнів. Тому приповерхневому шару властиві значення рухомості, часу життя та інших фізичних параметрів.

#### Загальна характеристика Si-SiO<sub>2</sub>

Властивості середовища на границі напівпровідника впливають на властивості приповерхневого шару. Прикладом можуть бути границі (контакти) НП з металами. Наявність метала на поверхні НП призводить до появи в останньому об'єднаних або збагачених шарів. Аналогічні процеси мають місце на границі НП з діелектриком.

Особливий інтерес представляє **границя кремнія з двоокисом кремнія**, бо поверхня сучасних НП інтегральних схем захищається окисним шаром. Крім того, в структурах МДП, що виконані на основі кремнія, в якості діелектрика теж використовується шар SiO<sub>2</sub>. Тому будемо розглядати структуру Si-SiO<sub>2</sub>.

**Головна особливість шарів** (плівок) двоокиса кремнія, що використовується в ІС, полягає в тому, що вони **завжди мають домішки донорного типу**. Найбільше поширені домішки такого типу це натрій, калій, водень. Всі вони містяться в типових розчинах, якими обробляються поверхні кремнія і його окисла.

**Донорні домішки**, властиві плівці SiO<sub>2</sub>, **зосереджені поблизу границі з кремнієм**. Тому в плівці SiO<sub>2</sub> на границі з кремнієм з'являється тонкий шар додатньо заряджених донорних атомів, а віддані ними електрони переходять в **приповерхневий шар кремнія**. Наслідки такого переходу залежать як від типу провідності НП, так і від концентрацій донорних домішок в діелектрику. Оскільки донорні атоми зосереджені в дуже тонкому шарі діелектрика, об'ємна концентрація (см<sup>-3</sup>) виявляється незручним параметром і замість неї використовують поверхневу концентрацію (см<sup>-2</sup>). **Характерними значеннями поверхневої концентрації донорів в двоокису кремнія є  $N_{\text{dSiO}_2} = (0.5-2.0) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$** .

Якщо кремній має провідність n-типу, то електрони, що перейшли в нього з окисла, збагачують його приповерхневий шар основними носіями: з'являється так званий n-канал (рис 3.14.а). Якщо кремній має провідність p-типа, то електрони, що прийшли в нього з окисла, або збіднюють приповерхневий шар, «оголюючи» відємні іони акцепторів (рис. 3.14.б), або створюють поруч з об'єднаним шаром тонкий інверсійний n-шар (рис. 3.14.в).

Поява незапланованих каналів під шаром SiO<sub>2</sub> в приборах, що працюють з використанням p-n переходів, так і МДП, може порушити структуру цих приборів і нормальну роботу елементів ІС.

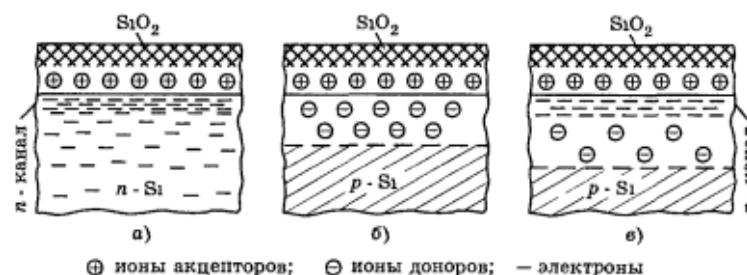


Рис. 3.14. Приповерхностная структура кремния на границе с окислом:  
а — обогащенный слой, б — обедненный слой, в — обедненный слой с инверсионным каналом

### 3.2. Окислення НП

Окислення кремнію – один з самих характерних процесів в сучасних ІС. Отримана при цьому плівка двоокиса кремнію виконує багато важливих функцій :

- **Функція захисту** – пасивізація поверхні і захист вертикальних ділянок р-п-переходів, що виходять на поверхню (рис.6.4.а)
- **Функція маски**, через вікна якої вводяться необхідні домішки (рис. 6.4.б)
- **Функція тонкого діелектрика** під затвором МОН-транзистора (рис. 6.4.в)

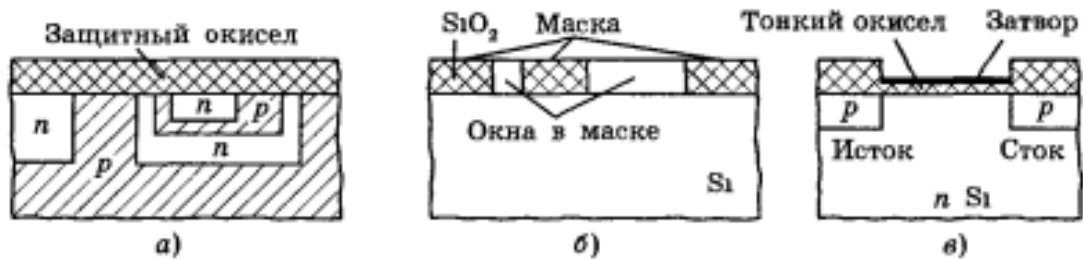


Рис 6 4. Функції двоокисной пленки кремния  
а — пассивация поверхности, б — маска для локального легирования,  
в — тонкий подзатворный окисел

Поверхня кремнію завжди покрита «власною» окисною плівкою, що з'явилась в результаті «природного» окислення при самих низьких температурах. Однак ця плівка має дуже малу товщину (приблизно 5нм), щоб виконувати якусь з перерахованих функцій. Тому в технології ІС плівки SiO<sub>2</sub> отримують штучним шляхом.

Штучні окиснення кремнію робляться при високій температурі (1000-1200 С) таке термічне окиснення можна проводити в атмосфері кисню (сухе окиснення), в суміші кисню з парами води (вологе окиснення) або просто в парах води.

В усіх випадках процес проводиться в окиснювальних печах. Основу таких печей складає як і при епітаксії кварцева труба, в яку поміщається «лодочка» з пластинами кремнію, що нагрівається або струмами високої частоти, або іншим шляхом. Через трубу пропускається потік кисню (сухого або вологого) або пари води, які реагують з кремнієм в високотемпературній зоні. Отримана таким чином плівка SiO<sub>2</sub> має атмосферну структуру.

Механізм окислення має 2 варіанта. Перший варіант складається з наступних етапів:

1. Дифузія атомів кремнію через вже наявну плівку окисла з поверхні.
2. Адсорбція молекул кисню поверхнею з газової фази
3. Власно окислення (хімічна реакція)

В цьому випадку плівка наростає над початковою поверхнею кремнію. Другий варіант складається з етапів:

1. Адсорбція кисню поверхнею вже наявного окисла
2. Дифузія кисню через окисел з ще не окисленим кремнієм.
3. Окиснення

В цьому випадку плівка наростає вглиб від початкової поверхні. На практиці обидва механізми поєднуються, але головну роль грає другий.

Швидкість росту окисла з часом повинна зменшуватись, бо новим атомам кисню доводиться дифузувати через все більш товстий шар окисла. Напівемпірична формула, що зв'язує товщину окисної поверхні з часом термічного окислення:  $d \approx k\sqrt{t}$

$k$ -параметр, що залежить від температури і вологості кисня.

Сухе окислення іде в десятки разів повільніше вологого. Наприклад для вирощування плівки SiO<sub>2</sub> товщиною 0,5мкм в сухому кисні при 1000 °C треба десь 5 годин, а вологим лише 20 хвилин. з зменшенням температури на кожні 100 °C час окислення зростає в 2-3 рази.

В технології ІС розрізняють тонкі і товсті окисли SiO<sub>2</sub>. Товсті окисли ( $d=0.5-0.8$  мкм) грають роль захисту і маскування. А тонкі ( $d=0.05-0.15$  мкм) – функції під затворного діелектрика в МОН-транзисторах.

Одною з важливих проблем при вирощуванні плівки SiO<sub>2</sub> є забезпечення однорідності. В залежності від якості поверхні пластини, від чистоти реагентів і режиму вирощування в плівці з'являються дефекти. Розповсюдженим типом дефектів є мікро- та макро-пори, аж до наскрізних отворів (особливо в тонкому окислі).

Якість окисної плівки підвищується з зменшенням температури вирощування, а також при використанні сухого кисню. Тому тонкий під затворний окисел, від якості якого залежить стабільність параметрів МОН-транзистора, роблять сухим окисленням. При вирощування товстого окисла чергують сухе і вологе окислення. Перше забезпечує відсутність дефектів, а друге дозволяє скоротити час процесу.

## 4.1 Легування. Дифузія.

### Легування:

Легування – додавання у склад матеріалів домішок для зміни (покращення) фізичних і/або хімічних властивостей основного матеріалу (а також утворення діодних та транзисторних структур). Одним із основних методів легування є дифузія.

### Дифузія:

Дифузія – процес взаємного проникнення молекул однієї речовини між молекулами іншої, що призводить до самовільного вирівнювання їх концентрацій.

Дифузія може бути **загальною та локальною**. При загальній дифузії в пластині утворюється тонкий дифузійний шар, при локальній – домішка розповсюджується не тільки в глибину пластини, але і у всіх перпендикулярних напрямках (бокова дифузія). Дифузія може проводитися однократно та багатократно.

**Введення домішок зазвичай реалізується за допомогою газотранспортних реакцій** – так само, як і при епітаксії та окисленні. Для цього використовуються дифузійні печі. Дифузант випаровується, змішується із потоком нейтрального газу-носія і надходить до пластин (напр. кремнію). Після цього атоми дифузанта проникають в пластини, а інші складові хімічного з'єднання виносяться газом-носієм із зони.

**Радіаційно – стимулююча дифузія.** Цей метод дифузії заснований на введенні домішки в результаті бомбардування напівпровідникового кристала легкими іонами з енергією, достатньою для зсуву атомів підкладки в міжвузлові положення. Глибина проникнення домішки з поверхневого джерела залежить від тривалості бомбардування, енергії іонів і інтенсивності опромінювання.

Розподіл концентрації домішок при цьому:

$$N(x,t) = N_s \exp \left[ -\frac{L_d^2}{D_0 t} \exp(x / L_d) \right]$$

$N_s$  - поверхнева концентрація,  $L_d$  - дифузійна довжина пробігу дефекту  
 $D_0 = N_{i0} D_n / N_m$  - коеф. дифузії, залежний від надмірної  $N_{i0}$  відносно термодинамічно-рівноважної  $N_m$  концентрації, коеф. дифузії вакансій  $D_n$

Робочі температури: 600-700°C, що значно нижче за температури високотемпературної дифузії. Напрямок дифузійного потоку визначається розташуванням шару порушень, створюваних іонним променем, швидкість генерації дефектів визначається параметрами іонного променя.

Радіаційно-стимулююча дифузія дозволяє одержувати леговані шари з різним профілем розподілу концентрації домішок. Даний метод дифузії найбільш доцільний при легуванні напівпровідникових з'єднань, а також напівпровідників, в яких дифузія відбувається при дуже високих температурах.

#### 4.2. 1-й та 2-й закони Фіка.

**Перший закон Фіка** характеризує швидкість дифузії атомів однієї речовини в іншу при постійному в часі потоці цих атомів і незмінному градієнті їх концентрації.

Коефіцієнт дифузії визначає густину потоку атомів речовини при заданому градієнті концентрації. Якщо глибина дифузії значно менша поперечних розмірів площі, на якій вона відбувається, то приймають, що дифузія йде в одному напрямі.

Одновимірне рівняння Фіка має вигляд:

$$J = -D(dN / dx)$$

$J$  - потік,  $D$  - коеф. дифузії,  $N$  - концентрація.

**Другий закон Фіка** визначає швидкість накопичення розчиненої домішки в будь-якій площині, перпендикулярній напрямку дифузії. Для одновимірного випадку.

$$\partial N / \partial t = D(\partial^2 N / dx^2) \quad (5)$$

Нехай  $x = 0$  - площина пластини, через яку вводиться домішка, товщина пластини -  $d$ ,  $d \ll L_d$ . Тоді  $N(d) = 0$ . Але математично зручніше:

$$N(\infty, t) = 0 \quad (6)$$

друга гранична умова – в залежності від різновиду техн. процесу:

##### **Дифузія із нескінченного дж. домішки**

Тут дифузانت неперервно поступає до пластини (при поверхнева конц. домішки  $N_s$  - стала).

$$N(0, t) = N_s = const \quad (7)$$

##### **Дифузія із обмеженого джерела**

Спочатку в тонкий при поверхневий шар вводять деяку к-сть атомів дифузанду, а потім джерело відключають і атоми розподіляються по глибині пластини перерозподіляються по глибині пластини при незмінній їх кількості.

Тоді граничну умову можна записати у вигляді

$$\int_0^\infty N(x) dx = Q = const \quad (8)$$

Вирішуючи р-ня (5) за умов (6) та (7), отримуємо для необмеженого джерела:

$$N(x, t) = N_s \operatorname{erfc}(x / 2\sqrt{Dt})$$

де  $\operatorname{erfc}$  - функція помилок.

Вирішуючи р-ня (5) за умов (6) та (8) отримуємо для обмеженого джерела:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Тобто отримуємо розподіл концентрації за ф-цією Гауса.

Глибина дифузійного шару – коорд.  $x = L_N$ , при якій конц. введеної домішки  $N$  рівна концентрації вихідної домішки  $N_0$ .

Для необмеженого дж.:  $L_N \approx 2\sqrt{Dt} \ln(N_s / N_0)$

Для обмеженого дж.:  $L_N = 2\sqrt{Dt} \ln\left(\frac{Q}{N_0 \sqrt{\pi Dt}}\right)$

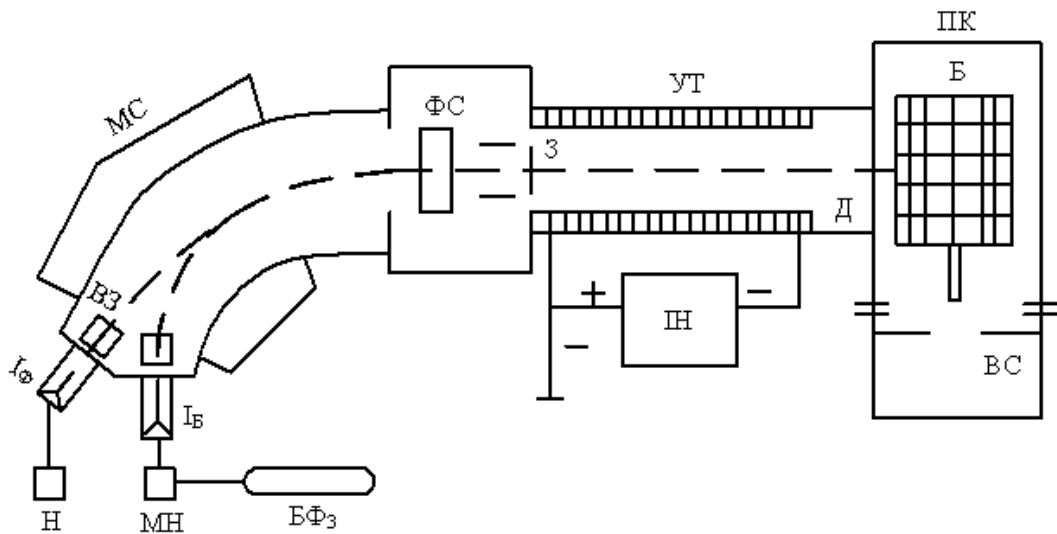
### 4.3. Іонне легування.

**Сутність іонного легування** полягає в такому: іони домішки, одержувані із спеціальних джерел, швидшають і фокусуються в електричному полі, потрапляють на підкладку, бомбардуючи її. Маючи велику енергію (10-103 кеВ), вони впроваджуються в поверхневий шар напівпровідника. При впровадженні в кристалічні ґратки іони втрачають свою енергію внаслідок кулонівської взаємодії з атомами ґратки, порушуючи або іонізуючи їх, так і через пружні (ядерних) зіткнення з атомами, в результаті яких утворюється велике число точкових дефектів ґратки (міжвузлові атоми підкладки і вакансії). В загальному випадку при іонному впровадженні атоми домішки частково займають певне положення в ґратках, а частково підпорядковане. **Для впорядкування** порушеної упровадженням іонів структури і тим самим створення електрично активної домішки підкладки піддають відпалу при температурі 650—700°C. Застосовують також лазерний відпал.

Таким чином, **процес іонного легування складається з впровадження іонів і відпалу, одночасного з упровадженням або після нього.**

**Характерною особливістю** іонного легування є те, що зміст упроваджених атомів домішки визначається не фізичними властивостями підкладки (як при дифузії), а умовами впровадження іонів і температурою відпалу, яка значно нижча, ніж при дифузії.

Іонне легування створюється **на установці**, схема якої показана на рис. 9.4.



Джерело іонів **1** складається з камери, призначеної для іонізації пари легуючих елементів, і екстрагуючого іоні зонда. Під дією напруги прискорювальної системи **2** (20-200 кВ) іонні пучки набувають необхідної енергії, достатньої потужної для іонного впровадження. Магнітний мас-сепаратор **3** служить для виділення іонів потрібної маси, що досягається розділенням руху частинок по різних траєкторіях у відповідності з їх масами під впливом магнітного поля. Сепарація за масами обумовлює високу чистоту легування.

Система сканування **4** забезпечує керування потоком іонів по поверхні підкладок, встановлених в багатопозиційному приймачі іонів **5**. Щоб уникнути зіткнень іонів при русі в установці підтримується вакуум ( $54 \cdot 10^{-5} - 14 \cdot 10^{-4}$  Па).

**Ефективність застосування іонного легування** визначається багатьма чинниками, головними з яких є: розподіл пробігів упроваджених атомів, ступінь і характер



безпорядковості ґратки, локалізація атомів в кристалічних ґратках і електричні властивості шарів після упродовження і відпалу.

#### Основні переваги іонного легування:

1. можливість точного завдання конфігурації розподілу концентрації домішки як за глибиною, так і за площею опромінювання. При цьому градієнт концентрації домішки в області *p-n*-переходу істотно більший, ніж у дифузійного профілю;
2. здійснення процесу при низьких температурах (біля 600 – 800°C для відпалу), що дозволяє зберігати заданий профіль розподілу концентрації домішок в структурах і їх електрофізичні параметри;
3. можливість легування кремнію і інших напівпровідників будь-якими легуючими домішками в різних кількостях, аж до граничної розчинності;
4. отримання ізотопної чистоти іонів легуючої домішки, сепарованих в магнітному полі;
5. відсутність впливу навколишнього середовища, оскільки процес здійснюється у вакуумі;
6. висока відтворність результатів завдяки точному контролю інтенсивності пучка і дози впроваджуваних іонів;
7. можливість здійснення на одній установці комплексу операцій, включаючи легування, металізацію і захист поверхні.

**Недоліки іонного легування** – складність технологічних установок і можливість утворення дефектного шару на поверхні підкладок.

**Іонне легування використовують** для створення біполярних транзисторів НВЧ-діапазону, МДН-транзисторів із затвором, що самопоеднується, діодів, високоомних резисторів і інших елементів напівпровідникових ІМС.



#### 4.4. Фізичні основи каналювання

Якщо швидка заряджена частка рухається в кристалі, то при деяких умовах і для певних траєкторій вона зазнає ряд зіткнень з атомами при практично однакових прицільних параметрах. У цьому випадку говорять, що індивідуальні зіткнення стають корельованими. Відхилення в кожному зіткненні з атомами будуть при цьому малі. Якщо така частинка рухається вздовж головних кристалографічних напрямків, вона зазнає серію малокутових корельованих відхилень на сусідніх атомах ланцюжка. Такі частинки називають каналірованими, а подібний режим руху називають Каналуванням заряджених частинок в кристалах. Атоми кристалічної решітки вздовж основних кристалографічних напрямків формують, так звані, канали, які обмежуються щільно упакованими атомними рядами або площинами (рис.1)

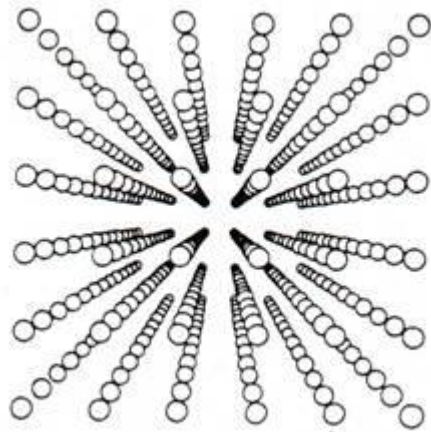


рис.1 Канали, що формуються атомними ланцюжками уздовж основних кристалографічних напрямків у кристалі.

Основна ідея, що істотно спрощує теоретичний аналіз ефекту каналювання в цілому, полягає в заміні справжнього потенціалу атомів кристала потенціалом, усередненим за координатами атомів вздовж напрямку кристалографічної осі або площині, що відповідає режимам, так званого, осьового або площинного каналювання. Таке наближення особливо ефективне, якщо кут падіння частки на вісь або площина досить малий.

#### 4.5. Співвідношення Ейнштейна

Эйнштейн заметил, что случайные силы, которые вызывают случайное блуждание при броуновском движении также вызывают вязкое трение, действующее на частицы при их движении в жидкости. Другими словами, *флуктуации* координат частиц относительно положения покоя имеют ту же природу, что и *диссипативная* сила трения, которую необходимо преодолевать, чтобы изменять систему в определённом направлении.

Из своих наблюдений он методами статистической физики вывел неожиданную связь между параметрами системы — соотношение Эйнштейна-Смолуховского:

$$D = \mu k_B T$$

связывающего  $D$ , коэффициент диффузии, и  $\mu$ , подвижность частицы ( $\mu$  выражается как отношение скорости частицы к приложенной силе,  $\mu = v_d / F$ ),  $k_B$  — Постоянная Больцмана, и  $T$  — абсолютная температура.

В неоднорідному напівпровіднику при термодинамічній рівновазі струм дорівнює нулю, тобто  $J = J_n + J_p = 0$ . У цьому випадку струми провідності зрівноважують дифузійні струми і на основі

$$\begin{aligned} J_n &= J_{n \text{ др}} + J_{n \text{ диф}} = en\mu_n E + eD_n \frac{dn}{dx} \\ J_p &= J_{p \text{ др}} + J_{p \text{ диф}} = ep\mu_p E + eD_p \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad \text{для електронів можна записати:} \quad n\mu_n E_{cm} = -D_n \frac{dn}{dx} \quad (1.1)$$

Оскільки в напівпровіднику існує статичне електричне поле  $E_{cm}$ , то електрони, що знаходяться в цьому полі будуть мати середню енергію  $U = -e\varphi$ . За відсутності виродження концентрація електронів у зоні провідності буде задовольняти співвідношенню Больцмана виду:

$$n = N_c e^{-(E_c + U - F)/kT} = n_0 e^{e\varphi/kT} \quad (1.2) \quad \text{де } n_0 - \text{рівноважна концентрація, } \varphi - \text{електростатичний потенціал.}$$

Враховуючи, що  $E_{cm} = -\frac{d\varphi}{dx}$ , а також підставляючи  $n$  та  $\frac{dn}{dx}$  в рівняння (1.1), отримаємо:

$$-\mu_n n_0 e^{e\varphi/kT} \frac{d\varphi}{dx} = -D_n \frac{en_0}{kT} e^{e\varphi/kT} \frac{d\varphi}{dx} \quad (1.3) \quad \text{Звідки для електронів будемо мати:}$$

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{e}{kT} \quad (1.4) \quad \text{Це – співвідношення Ейнштейна. Аналогічно для дірок: } \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{e}{kT} \approx 40$$

### 5.1. Епітаксія. Основні типи епітаксії та фізичні процеси, що її обумовлюють

Епітаксія – процес нарощування монокристалічних шарів на підкладку, при якому кристалографічна орієнтація нарощуваного шару повторює кристалографічну орієнтацію підкладки. Зазвичай використовується для отримання тонких робочих шарів однорідного н/п на відносно товстій підкладці, що відіграє роль несучої конструкції. Типовою – хлоридний процес епітаксії застосовується до кремнію, складається з наступного.

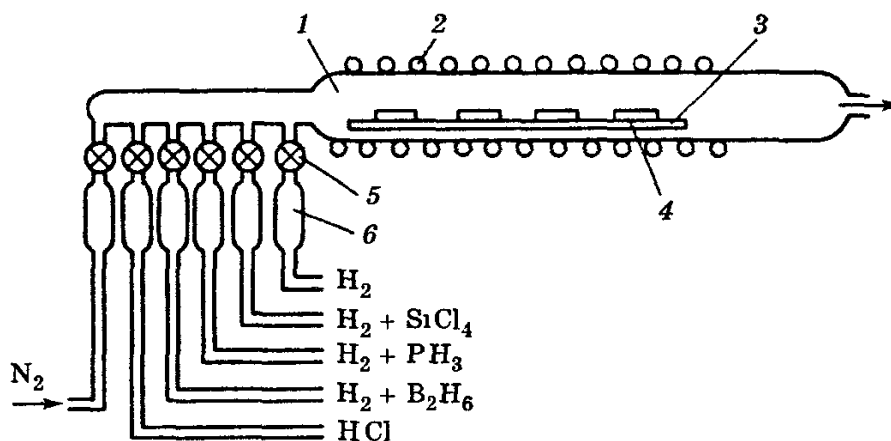
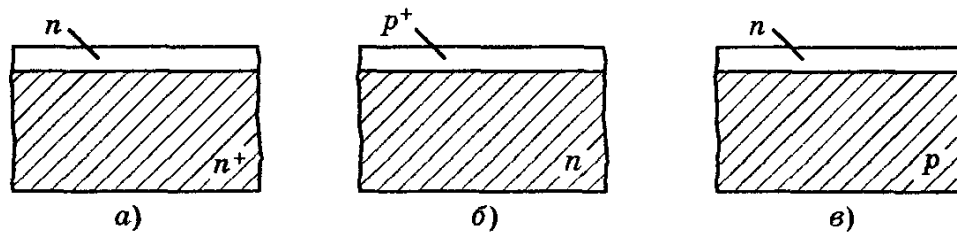


Рис. 6.2. Схема хлоридного процесу епітаксії: 1 — кварцевая труба; 2 — катушка ВЧ нагрєва; 3 — тигель с пластинами; 4 — пластина кремнія; 5 — вентиль для перекрытия соответствующего газа; 6 — измеритель скорости потока

Монокристалічні кремнієві пластини завантажують в тигель «лодку» і поміщають у кварцеву трубу. Через трубу пропускають потік водню, що містить незначну примісь тетрахлорида кремнію  $\text{SiCl}_4$ . При високій температурі (близько  $1200^\circ\text{C}$ ), яка забезпечується височастотним нагрівом тигля, на поверхні пластин проходить реакція  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si} + 4\text{HCl}$ .

У результаті реакції на підкладці поступово осаджується шар чистого кремнію, а пари  $\text{HCl}$  відносяться потоками водню. Епітаксійний шар осадженого кремнію монокристалічний та має ту ж кристалографічну орієнтацію, що і підкладка. Хімічна реакція, завдяки підбору температури, відбувається тільки на поверхні пластини, а не в оточуючому середовищі.

Процес у потоці газу – газотранспортна реакція, а основний газ (водень), що переносить домішку у зону реакції – газ-носії. Таким чином, епітаксія дозволяє вирощувати монокристалічні шари будь-якого типу провідності і будь-якого питомого опору на підкладці, якій властиві також будь-які типи та величина провідності.



**Рис. 6.3. Примеры эпитаксиальных структур:**

**а** — плівка  $n$ -типа на  $n^+$ -подложке; **б** — плівка  $p^+$ -типа на  $n$ -подложке;  
**в** — плівка  $n$ -типа на  $p$ -подложке

Способи отримання таких плівок називають **гетероепітаксією**, на відміну від **гомоепітаксії**, описаної вище. При гетероепітаксії матеріали плівки та підкладки повинні так само мати однакову кристалічну ґратку. У висновку зазначимо, що поміж описаної газової епітаксії, **існує рідинна епітаксія**, при якій нарощування монокристалічного шару відбувається із рідкої фази, тобто з розчину, що містить необхідні компоненти.

## 5.2. Молекулярно-променева епітаксія.

**Молекулярно-променева епітаксія** — це епітаксіальний ріст в умовах надвисокого вакууму. Дозволяє вирощувати гетероструктури із заданою товщиною з моноатомними гладкими гетеро границями з заданим профілем легування. В установках МПЕ є можливість досліджувати якість плівок прямо під час росту, тобто в камері. Для процесу епітаксії необхідні добре очищені підкладки з атомарно гладкою поверхнею.

В основі методу лежить осадження на кристалічну підкладку речовини, випареної з молекулярного джерела. Не дивлячись на досить просту ідею, реалізація даної технології потребує надзвичайно складного технічного рішення. Основні вимоги до установки епітаксії такі : підтримання надвисокого вакууму (близько  $10^{-8}$  Па); чистота матеріалів близько 99,999999%; потрібен молекулярне джерело, яке здатне випаровувати метали з можливістю регулювання густини потоку речовини.

Особливістю МПЕ є невисока швидкість росту плівки (менше 1000нм за годину). Основна перевага методу — можливість створення унікальних наноструктур з дуже високою чистотою, однорідністю і малою кількістю дефектів. Недоліки — це висока ціна обладнання і початкових матеріалів, малу швидкість росту, складність підтримування високого вакууму.

## 6.1. Фізичні принципи літографії. Типи та засоби літографії.

**Літографія** – один з найбільш поширених процесів для отримання наноструктур. Спершу літографією називали спосіб друку, при якому відбитки отримуються шляхом переносу фарби під тиском з плоскої печатної форми безпосередньо на гладку поверхню. Літографія в мікро- і нанoeлектроніці – це процес формування в нанесеному на поверхню підкладки спеціальному чутливому шарі (резисті), рельєфного малюнка, що повторює топологію мікросхеми, з подальшим переносом цього малюнка на зразки.

**Етапи літографії** (рис. 1) – 1) очистка підкладки; 2) формування маски з резисту, нанесення на підкладку, сушка; 3) суміщення, експонування; 4) проявлення; 5) травлення; 6) зняття резисту. В складних літографічних технологіях ці процеси можуть повторюватись багатократно.

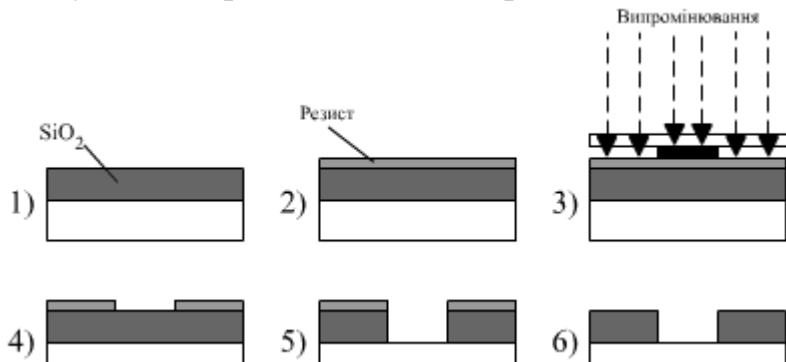


Рис. 1. Етапи літографії

Зазвичай, використовуються підкладки з кремнію, легованого бором (кремній *p*-типу) або фосфором (кремній *n*-типу). Резисти – органічні багатокомпонентні полімерні композити, що чутливі до будь-якого високоенергетичного випромінювання (оптичного, рентгенівського, потоку іонів чи електронів). Резисти застосовуються для формування заданого рельєфу на поверхні плівки і її захисту від дії правителів. Їх наносять на поверхню підкладки в розчиненому вигляді, після чого висушують.

**Експонування** – процес опромінювання світлочутливого матеріалу активним електромагнітним випромінюванням. Під впливом високоенергетичного випромінювання змінюються властивості резисту (розчинність в слабких лужних розчинах, хімічна стійкість). В залежності від типу випромінювання резистної плівки, відрізняють наступні типи літографії: **фотолітографія** (довжина хвилі УФ випромінювання 250-440 нм), **рентгенівська літографія** (довжина хвилі

рентгенівського випромінювання 0,01-1 нм), **електронна літографія** (потік електронів з енергією 10-100 KeV, або довжина хвилі 1-0,0001 нм), **іонна літографія** (довжина хвилі випромінювання іонів 0,05-0,1 нм).

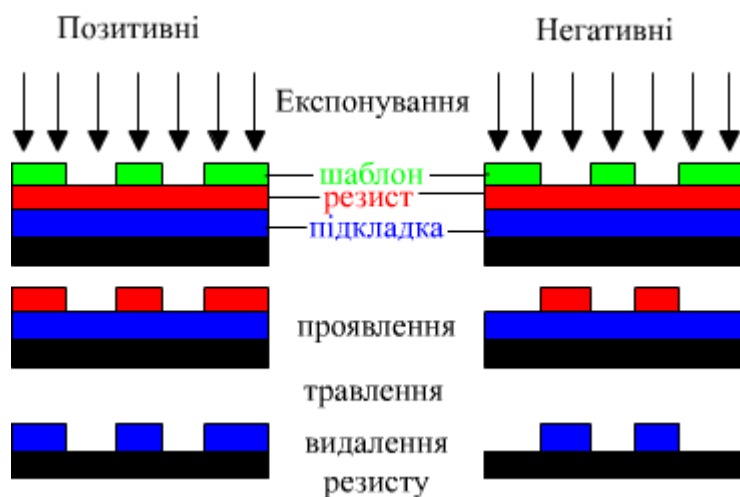


Рис. 2. Позитивні і негативні резисти

В залежності від реакцій, що протікають в резистах, їх ділять на **позитивні і негативні**. В негативних під дією випромінювання відбувається полімеризація

мономерних молекул з утворенням полімерів, в результаті чого

розчинність резиста на опромінених ділянках зменшується, і після проявлення вони

залишаються на поверхні підкладки. В позитивних резистах в результаті реакції розпаду відбувається розрив зв'язків в молекулах полімерів, і на опромінених ділянках розчинність пречиста збільшується. При проявленні позитивних резистів опромінені ділянки видаляються, а не опромінені залишаються на підкладці. (рис. 2).

Наступний етап – обробка не закритих резистивним шаром ділянок поверхні підкладки, через сформовані на її поверхні резистивні маски, і перенос малюнка топологічного шару на підкладку. Зазвичай обробка пов'язана з травленням поверхні металу, що осів на підкладку раніше. Останньою операцією являється видалення резисту з поверхні підкладки.

## 6.2. Можливості оптичної літографії.

Літографія заснована на властивостях стійкого до подальших агресивних технологічних дій матеріалу – *резисту*, здатного необоротно змінювати свої властивості під впливом опромінювання з певною довжиною хвилі. При цьому шар резисту наносять на поверхню тіла, що піддається локальному обробленню, і опромінюють його через спеціально призначений для цих цілей *шаблон*. В результаті хімічного оброблення при проявленні з окремих ділянок резист видаляється а той, що залишився на поверхні резист використовується як маска. Резист служить як основна або проміжна контактна маска при локальному обробленні. Залежно від довжини хвилі  $l$ , застосованого опромінювання розрізняють оптичну ( $l = 300\text{--}400$  нм), електронну ( $l = 0,1$  нм), рентгенівську ( $l = 0,1\text{--}1$  нм) і іонно-променеву ( $l = 0,05\text{--}1$  нм) літографію. Оптична літографія (фотолітографія) може бути контактною і безконтактною (фотолітографія з мікросазором і проекційна фотолітографія).

Фотолітографічний процес включає в себе хімічну очистку поверхні підкладки від слідів різноманітних домішок, окислення очищеної поверхності підкладки із створенням захисного шару  $\text{SiO}_2$ , нанесення на окислену поверхню тонкої плівки фото чутливого матеріалу (фоторезисту), експонування (опромінення) фоторезиста через маску і видалення (травлення) негативного фоторезиста з неопромінених ділянок чи позитивного фоторезисту з опромінених ділянок. В оптичній літографії всі деталі експонуються одночасно. Пластина кремнію з нанесеним малюнком поміщається в середовище, з якого в кремій через «вікна» у фоторезисті вводяться атоми легуючої суміші. Повторення процедури окислення, фотолітографії та легування дозволяє селективно вводити атоми легуючої суміші р- та n-типу в дуже малі за розміром області на поверхні кристалу. Найменші розміри елементів, які можна отримати за допомогою класичної оптичної літографії обмежені довжиною хвилі світла. Фотолітографія з довжиною хвилі  $\sim 400$  нм дозволяє серійно отримувати ІМС з мінімальним розміром 2-3 мкм, які вміщують до  $10^5$  транзисторів. На даний час в наукових лабораторіях створюються нові фоторезисти, які б змогли привести до збільшення процесу роздільної здатності оптичної літографії до 0,5 мкм.

## 6.3. Особливості рентгенівської, електронної та іонної літографії.

**Іонна літографія** являє собою сучасний прогресивний метод створення топології мікроструктур з використанням іонних чи електронних пучків випромінювання. Маса іонів значно більша маси електронів, тому пучки протонів чи іонів значно менше піддаються впливу паразитних електричних полів. З цієї ж причини іонні пучки легше фокусувати та центрувати. Через відсутність ефекту близькості іонно-оптична система дозволяє добре фокусувати зображення та виключати виникнення півтіньових викривлень. Внаслідок великого перерізу пучка протонів і високій чутливості позитивного речисту до протонного випромінювання експонування проходить за частки секунди, що дозволяє створювати процеси з високою продуктивністю. Є три методи іонно-променевої літографії – з використанням іонно-проекційних систем; сфокусованих пучків; центрованих керованих іонних пучків.



**Електронна літографія** чи електронно-променева – метод нанолітографії з використанням електронного пучка. Гостросфокусований електронний пучок, який відхиляється магнітною системою, промальовує потрібні конфігурації на поверхні чутливого до електронного опромінення речиста, нанесеного на підкладку. Керування електронним пучком відбувається за допомогою зміни струмів у відхиляючих магнітних системах, якими керують з комп'ютера. Засвічені ділянки фоторезиста полімеризуються і стають нерозчинними. Далі незасвічені ділянки змиваються підібраним розчинником. Через отримані вікна проводиться вакуумне напылення підходящого матеріалу, наприклад нітриту титану чи металів. Полімеризований резист змивають іншим розчинником, після видалення підкладки остаточно формують маску для використання у фотолітографії. Таким методом дозволяє на сьогоднішній день отримувати структури з роздільною здатністю не менше 1 нм, що недосяжно для ультрафіолетового випромінювання, завдяки більш короткій Де-Бройлівській довжині хвилі. Цей метод використовується не для промислового виробництва, а для виробництва манометрових компонентів, які потрібні для наукових досліджень.

**Рентгенівська літографія** технологія виготовлення електронних мікросхем; варіант фотолітографії, яка використовує опромінення за допомогою рентгенівських променів.

Використовується м'яке рентгенівське випромінювання з довжиною хвилі 0,4 – 5,0 нм. Пучок рентгенівських променів пропускається через шаблон і експонується шар резисту. Оптичними елементами рентгенівських літографічних установок можуть бути відбиваючі дзеркала (рефлектори) на основі наногетероструктур з шарами Ni-C, Cr-C, Co-C, Mo-C, W-C та зонні пластинки. В якості шаблонів використовуються тонкі (1 мкм і менше) металічні мембрани. Багатошарові рентгенівські дзеркала забезпечують Брегівське відбиття при умові  $d = \lambda / (2 \sin \theta)$ , де  $d$  – період структури,  $\theta$  – ковзний кут. При перпендикулярному падінні  $\theta = 90^\circ$  і період  $d = \lambda / 2$ , тому товщина кожного шару в дзеркалі дорівнює приблизно  $\lambda / 4$  чи 1 нм. Рентгенолітографія як і оптична, здійснюється шляхом одночасного експонування більшої частини деталей малюнка, а оскільки короткохвильове рентгенівське випромінювання дозволяє створювати з більш тонкими деталями та з більшою роздільною здатністю (~ 10 нм). Порівняно з електронно-променевою та іонною в рентгенолітографії малі радіаційні пошкодження структур, які формуються і висока продуктивність завдяки можливості одночасної обробки великої площі зразка. Рентгенолітографія відрізняється великою глибиною різкості і малим впливом матеріалу підкладки і її топографії на роздільну здатність.



### 7.1.Травлення. Техніка масок. Типи травників.

В загальному випадку травлення можна розглядати як не механічні способи зміни рельєфу поверхні твердого тіла.

Класичний процес **хімічного травлення** полягає в хімічній реакції рідкого травника з твердим тілом з утворенням розчинного з'єднання. Перехід поверхневого шару твердого тіла у розчин означає його видалення. Таке **травлення проходить плавно** – один молекулярний шар за іншим на відміну від механічного видалення. Вибираючи травник, його концентрацію, температуру і час травлення, можна доволі точно регулювати товщину шару, що видаляється. Для більш рівномірного травлення і видалення продуктів реакції з поверхні ванночку з розчином обертають у нахиленому положенні(**динамічне травлення**) або вводять в розчин ультразвуковий вібратор (**ультразвукове травлення**). **Електролітичне травлення** відрізняється тим, що хімічна реакція розчину з твердим тілом і утворення розчинного з'єднання проходить в умовах протікання струму через рідину, при чому тверде тіло відіграє роль аноду. Цей метод значно зменшує кількість використовуваних матеріалів. Перевагою цього методу є можливість регулювання швидкості травлення шляхом зміни струму у колі, і зупиняти це процес шляхом його відключення. **Іонне травлення**(не пов'язане з використанням рідини). Пластина з кремнію розміщується в розрідженому просторі, у якому недалеко від пластинки створюють тліючий розряд. Простір тліючого розряду заповнено нейтральною електронно-іонною плазмою. На пластину відносно плазми подається достатньо великий від'ємний потенціал. В результаті додатні іони плазми бомбардують поверхню пластини і шар за шаром вибивають атоми з поверхні. Переваги цього методу полягають у тому, що непотрібно підбирати окремий тип травника для кожного матеріалу, а його недолік – у використанні дорогого обладнання і великих затрат часу на створення вакууму у них. **Анізотропне травлення** – цей метод оснований на тому, що швидкість хімічних реакцій залежить від напрямлень у кристалі. Тому при використанні спеціальних анізотропних травників швидкість травлення буде різною в різних напрямках і бокові стінки лунок набувають певного рельєфу.

**Травники** використовують у хімічному і електрохімічному травленні. Травники для електрохімічного травлення за відсутності електричного струму можуть взагалі не впливати на матеріал, або їх взаємодія може відрізнитися від взаємодії при протіканні електричного струму. **Травники поділяють на однокомпонентні, багатокомпонентні, селективні, неселективні.** Ступінь селективності травника також може бути різною. Компоненти багатокомпонентних травників виконують 3 основні функції: модифікація поверхні матеріалу, що обробляється(окислення поверхні); розчин модифікованого матеріалу(розчин утвореного окислу); керування процесом травлення(пришвидшення, уповільнення, надання або усунення селективності травлення).

**Маски** забезпечують локальний характер напилення, легування, травлення, а в деяких випадках і епітаксії. Будь-яка маска має сукупність заздалегідь спроектованих отворів – вікон. Провідне місце у виготовленні масок займає фотолітографія. Малюнок майбутньої маски виготовляється у вигляді фотошаблону. Фотошаблон – товста скляна пластина, на одній із сторін якої нанесено тонку непрозору плівку з необхідним малюнком у вигляді прозорих отворів. На окислену

поверхню пластини наносять краплю фоторезиста. За допомогою центрифуги краплю розподіляють тонким шаром по всій поверхні. Отриману плівку фото резистора висушують до затвердіння. На пластину покриту фоторезиста накладають фотошаблон та розміщують його під кварцовою лампою. Після цього фотошаблон знімають. Після термообробки фоторезиста на ньому утворюються вікна на місцях, які відповідають прозорим ділянкам на фотошаблоні. Тепер шар фоторезиста являє собою маску.

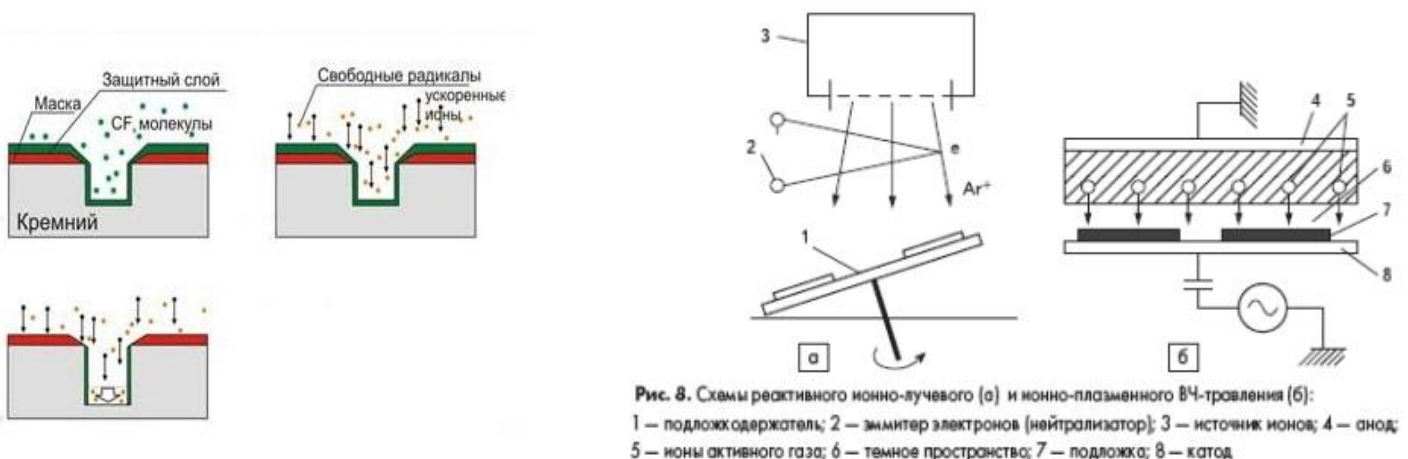
## 7.2. Фізико-хімічні процеси при травленні.

Травлением в микроэлектронике называют немеханические способы изменения поверхности твердого тела. **Процесс химического травления** – химическая реакция жидкого травителя с твердым телом с образованием растворимого соединения, которое смешивается с травителем и удаляется вместе с ним. Переход поверхностного слоя твердого тела в раствор означает удаление этого слоя. В отличие от механического удаления, травление обеспечивает гораздо большую прецизионность процесса: травление происходит плавно – один мономолекулярный слой за другим. Для равномерности травления вводят в раствор ультразвуковой вибратор (ультразвуковое травление).

Электролитическое травление отличается тем, что химическая реакция и образование растворимого соединения происходят в условиях протекания тока через жидкость, причем твердое тело играет роль одного из электродов – анода. Твердое тело в данном случае должно обладать достаточной электропроводностью. Преимуществом электролитического травления является возможность регулировать скорость травления путем изменения тока в цепи и прекращать процесс путем ее обрыва.

**Ионное травление** не связано с использованием жидкостей. Пластина кремния помещается в разреженное пространство, в котором, невдалеке от пластины, создается тлеющий разряд. Пространство тлеющего разряда заполнено квазинейтральной электронно-ионной плазмой. На пластину относительно плазмы подается отрицательный потенциал. В результате положительные ионы плазмы бомбардируют поверхность пластины и слой за слоем выбивают атомы с поверхности. Напряжение, свойственное ионному травлению (2–3 кэВ), значительно меньше ускоряющих напряжений при ионной имплантации, поэтому внедрение ионов в пластину не происходит.

Процесс **плазмохимического травления** происходит вследствие химического взаимодействия подложки с активными реагентами плазмы и содержит следующие основные стадии: образование в плазме химически активных частиц – в первую очередь атомов галогенов, кислорода и галогенсодержащих радикалов, адсорбцию их на поверхности материала, диффузию вглубь материала под поверхностный слой атомов, химические реакции в твердом теле с образованием летучих галогенидов, оксигалогенидов материалов и окислов (в случае травления полимеров), десорбцию летучих продуктов с поверхности материала и распыление нелетучих продуктов. После чего происходит откачка продуктов реакции из рабочей камеры при помощи откачной системы.



плазмохимическое травление

ионное травление

### 7.3. Селективные травления.

**Селективное травление** – выборочное травление отдельных участков поверхности твёрдых тел. В идеализированной ситуации травитель не действует на те элементы, воздействие на которые не предполагается в технологическом процессе. В реальной ситуации скорости травления всех материалов контактирующих с травителем конечны, а о селективности говорят в смысле отношении скоростей травления для различных материалов.

Различают **структурное селективное травление** - для выявления структуры кристаллических материалов с целью их изучения или обнаружения дефектов; собственно **технологическое** - для создания рельефного рисунка на полупроводниковых пластинах или многослойных структурах; **анизотропное** - для создания прецизионных микрорельефов на поверхности монокристаллов. Эти виды С. т. осуществляются с помощью защитной маски из химически стойкого материала, не взаимодействующего с травителем. При технологич. С. т. травитель активно взаимодействует с осн. материалом равномерно на всех участках поверхности полупроводника, не закрытых маской. Для проведения анизотропного С. т. обрабатываемая поверхность выбирается параллельной кристаллографич. плоскости с наименьшей плотностью упаковки атомов кристалла.

**Структурное** химическое травление приводит к образованию ямок (бугорков) травления, выявляет дислокации, неоднородности распределения примесей и другие дефекты, т.е. микроструктуру поверхности. Селективное химическое травление позволяет выявить дефекты кристаллической структуры подложек (границ зерен, малоугловых и двойниковых границ, дислокаций, дефектов упаковки и т.д.); выявить плоскости с малыми индексами для оптической ориентации кристаллов; проводить препарирование и разделение многослойных гетероэпитаксиальных структур и т.д.

**При анизотропном травлении** по различным кристаллографическим направлениям процесс происходит с различной скоростью. Различают также анизотропное травление диэлектрической пленки под литографической маской. Это процесс травления с нулевым смещением. Обеспечивает формирование вертикального профиля края элемента, совпадающего с краем маски. В этом случае травление пленки в горизонтальном направлении под маску не происходит, рисунок переносится с идеальной точностью.

**Технологическое селективное травление** осуществляется с помощью масок, фотошаблонов. Примерами могут служить селективное травление при фотолитографии и травление ионами. Так под действием света в фоторезисте происходят фотохимические реакции. «Засвеченная» часть позитивного фоторезиста после специальной процедуры дублирования теряет химическую стойкость и удаляется специальным химическим травителем, который удаляет только экспонированную часть плёнки фоторезиста. В негативном фоторезисте всё наоборот – под действием света и дублирования он становится более химически стойким и не удаляется травителем. Таким образом, вскрываются окна в слое фоторезиста, и сквозь эти окна можно стравить уже слой окисла. В случае ионного травления обрабатываемая пластина закрывается маской и нужные участки стравливаются ионным потоком.

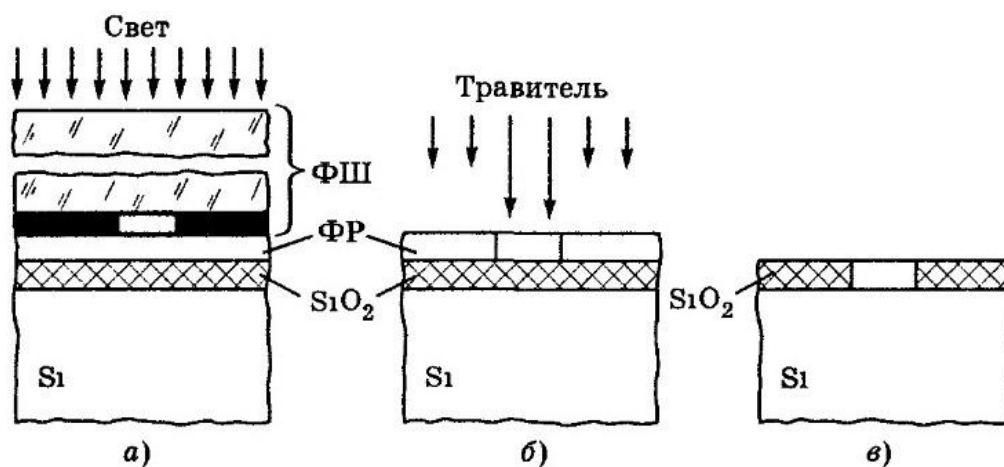


Рис. 6.12. Этапы процесса фотолитографии. *а* — экспозиция фоторезиста через фотошаблон; *б* — локальное травление двуокиси кремния через фоторезистную маску, *в* — окисная маска после удаления фоторезиста

#### 7.4. Іонне та плазмохімічне травлення.

При **іонному травленні** пластина кремнію розміщується в розрідженому просторі в якому, недалеко від пластини, створюється тліючий розряд. На пластину відносно плазми розряду подається **достатньо великий від'ємний потенціал**. В результаті додатні йони плазми бомбардують поверхню пластини, шар за шаром вибиваючи атоми з поверхні.

Іонне травлення, як і хімічне, може бути **загальним та локальним**. Перевага локального травлення полягає в відсутності підтравлювання під маску: стінки витравленого рельєфу майже вертикальні, а площі заглиблень рівні площі вікон в масці.

Цей тип травлення універсальний: не треба індивідуально підбирати травники під кожен матеріал. Недоліки полягають в дорожнечі установок та затрат по часу на створення потрібного вакуума.

На відміну від іонного травлення, **плазмохімічне** ґрунтується на руйнуванні матеріалу йонами активних газів, що утворюються в плазмі газового розряду та вступають в хімічну реакцію з атомами матеріалу при бомбардуванні пластин. При цьому молекули газу в розряді розпадаються на реакційно-здатні частинки: електрони, йони та вільні радикали, що хімічно взаємодіють з поверхнею, яка травиться. В результаті цих реакцій утворюються летючі сполуки, що десорбують з пластини. Для травлення кремнію найбільш часто використовують високочастотну плазму тетрафториду вуглецю  $\text{CF}_4$

### 8.1. Нанесення тонких плівок: термічне та катодне напилювання.

Тонкі плівки не тільки є основою тонкоплівкових ГІС, але широко використовуються і в напівпровідникових інтегральних схемах. Існує три основні методи нанесення тонких плівок на підкладку і один на одного: термічне (вакуумне) напилення, іонно-плазмове напилення і електрохімічне осадження. Іонно-плазмове напилення має два різновиди: катодне напилення і власне іонно-плазмове.

#### Термічне (вакуумне) напилювання

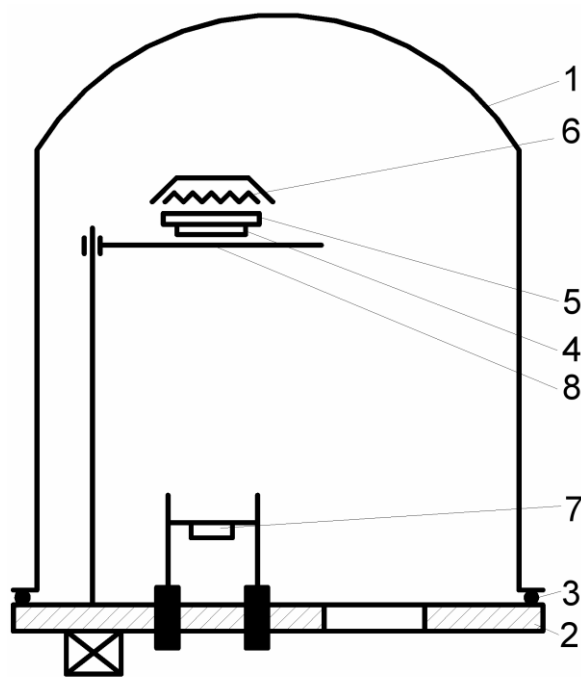
Металевий( скляний )ковпак 1 розташований на опорній плиті 2. Між ними знаходиться прокладка 3, що забезпечує підтримку вакууму після відкачування підковпачного простору. Підкладка 4, на яку проводиться напилення, закріплена на тримачі 5. До тримача примикає нагрівач 6 (напилення проводиться на нагріту підкладку). Випарник 7 включає в себе нагрівач і джерело напилюваної речовини. Поворотна заслінка 8 перекриває потік парів від випарника до підкладки: напилення триває протягом часу, коли заслінка відкрита. Нагрівач звичайно являє собою нитку або спіраль з тугоплавкого металу (вольфрам, молібден тощо), через яку пропускається достатньо великий струм. Замість ниток напруження використовують нагрівання за допомогою електронного променя або променя лазера.

На підкладці створюються найбільш сприятливі умови для конденсації парів, хоча

частково конденсація відбувається і на стінках ковпака( при надто низькій температурі підкладки адсорбовані атоми нерівномірно розповсюджуються, занадто висока температура підкладки приводить до відриву щойно осілих атомів). Коли зчеплення плівки з підкладкою або іншою плівкою погана на підкладку спочатку наносять так званий підшар, що характерний гарною адгезією, а потім на нього напилюють основний матеріал, у якого адгезія з підшаром теж хороша.

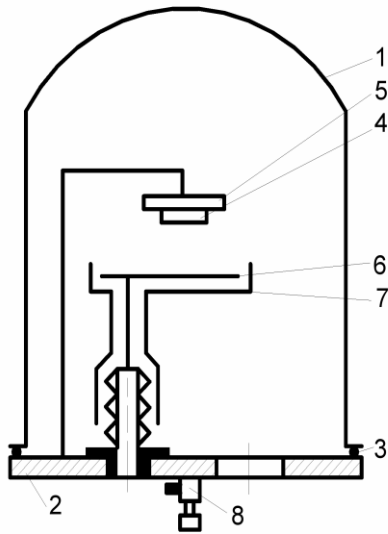
Вакуум в установках термічного напилення повинен бути якомога вищим, для того, щоб атоми газу, що летять від випарника до підкладки, зазнавали мінімальну кількість зіткнень з атомами залишкового газ(критерій:середня довжина вільного пробігу атомів в кілька разів перевищувала відстань між випарником і підкладкою).

Перевага: простота і можливість отримання виключно чистих плівок (при високому вакуумі). Недоліки : труднощі напилення тугоплавких матеріалів і трудність відтворення на підкладці хімічного складу випарюємої речовини. Останнє пояснюється тим, що при високій температурі хімічні сполуки дисоціюють, а їх складові конденсуються на підкладці роздільно





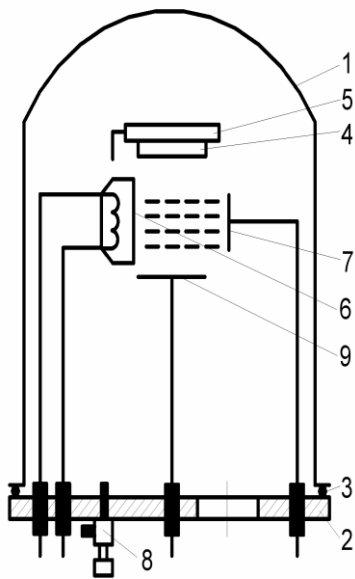
## Катодне напилювання



Тут відсутній випарник; його місце займає катод 6, який або складається з напилюваної речовини, або електрично контактує з нею. Роль анода виконує підкладка разом з утримувачем. Підковпачний простір спочатку відкачують, а потім у нього через штуцер 8 вводять деяку кількість очищеного нейтрального газу (найчастіше Ar). При подачі високої (2-3 кВ) напруги на катод (анод заземлений) в просторі анод-катод виникає аномальний тліючий розряд, що супроводжується утворенням квазінейтральної електронно-іонної плазми. Специфіка аномального тліючого розряду : в прикатодному просторі утворюється настільки сильне електричне поле, що позитивні іони газу, прискорювані цим полем і бомбардуючі катод, вибивають з нього не тільки електрони (необхідні для підтримки розряду), але і нейтральні атоми. Катод поступово руйнується. В даному випадку вибивання атомів з катода є корисним процесом, аналогічним випаровуванню. Переваги: розпорошення катода не пов'язане з високою температурою. Проте в даному методі катод повинен володіти високою електропровідністю=> обмежений асортимент напилюваних матеріалів. Це обмеження значною мірою усувається при використанні так званого реактивного (або хімічного) катодного напилення ( особливість : в додаванні до основної маси інертного газу невеликої кількості активних газів, здатних утворювати необхідні хімічні сполуки з розпиляним матеріалом катода). Недоліки: деяка забрудненість плівок (через використання порівняно низького вакууму), менша в порівнянні з термічним методом швидкість напилення (з тієї ж причини), а також складність контролю процесів.



## 8.2. Іонно-плазмове напилювання.



Головна його особливість в порівнянні з методом катодного напилення : в проміжку між електродами 9 - мішенню і підкладкою 4 діє незалежний, «черговий» газовий розряд. Розряд має місце між електродами 6 і 7, причому тип розряду - несамотійний дуговий. Процес напилення : на мішень відносно плазми подається негативний потенціал (2-3 кВ), достатній для виникнення аномального тліючого розряду і інтенсивного бомбардування мішені позитивними іонами плазми. Вибивані атоми мішені потрапляють на підкладку і осідають на ній=>принципових відмінностей між процесами катодного і іонно-плазмового напилення немає. Розрізняються лише конструкції установок: їх

називають відповідно двох-і трьох-електродними. Початок і кінець процесу напилення визначаються подачею і відключенням напруги на мішені. Якщо передбачити механічну заслінку, то її наявність дозволяє реалізувати важливу додаткову можливість: якщо до початку напилення закрити заслінку і подати потенціал на мішень, то матиме місце іонне очищення мішені. Таке очищення корисне для підвищення якості напилюваної плівки. Аналогічне очищення можна проводити на підкладці, подаючи на неї (до напилення плівки) негативний потенціал.

При напиленні діелектричних плівок виникає ускладнення, пов'язане з накопиченням на мішені позитивного заряду, що перешкоджає подальшому іонному бомбардуванню. Це ускладнення долається використанням високочастотного іонно-плазмового напилення. У цьому випадку на мішень поряд з постійною негативною напругою подається змінна напруга високої частоти (бл. 15 МГц) з амплітудою, що дещо перевищує постійну напругу. Тоді під час більшої частини періоду результуюча напруга негативна; при цьому відбувається звичайний процес розпилення мішені і на ній накопичується позитивний заряд. Однак під час невеликої частини періоду результуюча напруга позитивна; при цьому мішень бомбардується електронами з плазми, тобто розпилення не відбувається, зате компенсується накопичений позитивний заряд. Переваги власне іонно-плазмового методу в порівнянні з катодним полягають у більшій швидкості напилення і більшій гнучкості процесу (можливість іонного очищення, можливість відключення робочого ланцюга без переривання розряду і ін); Крім того, на якості плівок позначається вищий вакуум.

### **8.3 Металізація та отримання діелектричних плівок у тонкоплівковій технології.**

Металізація - метод модифікації властивостей поверхні виробу шляхом нанесення на його поверхню шару металу. Металізації піддаються як неметалеві поверхні (скло, бетон, пластмаса) так і металеві. В останньому випадку металізацією наноситься інший матеріал, наприклад, більш твердий або корозійно-стійкий (хромування, цинкування, алюмінівання). Часто «металізацією» називають напилення металу методами газотермічного напилення.

Основний матеріал – алюміній(малий питомий опір, гарну адгезію до окислу, можливість зварювальних контактів з алюмінієвою і золотою дротиною, відсутність корозії, дешевизна)

При створенні металічної розводки спочатку на всю поверхню ІС напилюють суцільну плівку алюмінію. Ця плівка контактує із шарами кремнію через спеціальні вікна. Покриваючи плівку алюмінію фоторезистом отримують маску, котра захищає майбутні смужки металізації і контактні площадки. Після витравлювання алюмінію і видалення фоторезисту залишається запланована металічна розводка.

### 9.1. Аморфні та полікремнієві плівки в мікроелектроніці

Побудова приладів на основі аморфних і полікристалічних плівок в сучасній мікроелектроніці обумовлено фізичними особливостями неупорядкованих систем, різноманітністю фізичних форм і властивостей, які притаманні лише цим класам речовин.

Найбільш перспективними з аморфних напівпровідників (плівки товщиною не більше 1 мкм) є S, Ge, As, Ti, In, Sb, Se або їх сплави, а також діелектрики на основі окислів цих напівпровідників або окислів тугоплавких металів перехідної групи, наприклад Gr, Ti, Ta, Mo, Nb.

**Аморфні матеріали класифікуються** наступним чином: матеріали з різко змінним значенням питомого опору, матеріали з від'ємним диференціальним опором, матеріали з двома керованими станами електропровідності, матеріали з двома стійкими станами перемикання, функціональні матеріали, які об'єднують властивості перерахованих матеріалів.

**Властивості кремнієвих плівок** повністю залежать від їх параметрів, таких як структура (аморфний, полікристалічний), рівень легування тощо. Легований фосфором полікремній травиться та окислюється швидше ніж слаболегований або нелегований. Оптичні властивості полікремнія також залежать від його структури. Найбільш помітно зі зміною структури змінюється уявна частина діелектричної проникності.

**Полікремній** звичайно використовується в якості електрода затвору в МОН приладах, як провідник для багаторівневої металізації та як матеріал контакту для приладів з неглибокими р-n-переходами. Як правило, осаджуваний полікремній не легований. Домішки вводяться на етапі осадження або після нього дифузійним або методом йонної імплантації. При додаванні до полікремнія кількох відсотків кисню, він стає напівізолюючим матеріалом, що використовується для пасивації ІС.

## 9.2. Елементи мікроелектроніки на основі аморфних речовин та полікристалів.

**Властивості кремнієвих плівок** повністю залежать від їх параметрів, таких як структура (аморфний, полікристалічний), рівень легування тощо. Легований фосфором полікремній травиться та окислюється швидше ніж слаболегований або нелегований. Оптичні властивості полікремнія також залежать від його структури. Найбільш помітно зі зміною структури змінюється уявна частина діелектричної проникності.

**Властивості аморфних матеріалів** дають можливість побудувати порогові перемикачі, комірки пам'яті, перебудовувані ключі пам'яті з двома стійкими станами, тунельні плівкові емітери.

Полікремнієві плівки мають маленьку зернистість і через це мають великий опір, що ускладнювало отримання опорів в широкому діапазоні значень. При цьому властивості полікристалічних плівок істотно залежать від стану поверхні, що визначають зародження зерен. Крім того, процес осадження плівок кремнію, мають полікристалічну структуру, відбувається при температурах вище  $600^{\circ}\text{C}$ , що збільшує градієнт температур по зоні осадження та також призводить до нерівномірності і невідтворюваності властивостей плівок. На їх основі виготовляють практично всіх типи біполярних ІС, значної частини МОН і КМОН ІС, дискретних приладів, ПЗЗ і ППЗП.

Полікремній звичайно використовується для формування високоомних резисторів, в якості електрода затвору в МОН приладах, як провідник для багаторівневої металізації та як дифузійне джерело для приладів з неглибокими р-п-переходами.

### 10.1. Способи ізоляції елементів: Ізоляція р-п переходом.

Елементи біполярних напівпровідникових ІС потрібно ізолювати одні від одних з метою, щоб потрібні з'єднання здійснювалось тільки шляхом металічної розводки.

Всі відомі способи ізоляції поділяють на 2 головні типи: зворотно зміщеним р-п переходом та діелектриком.

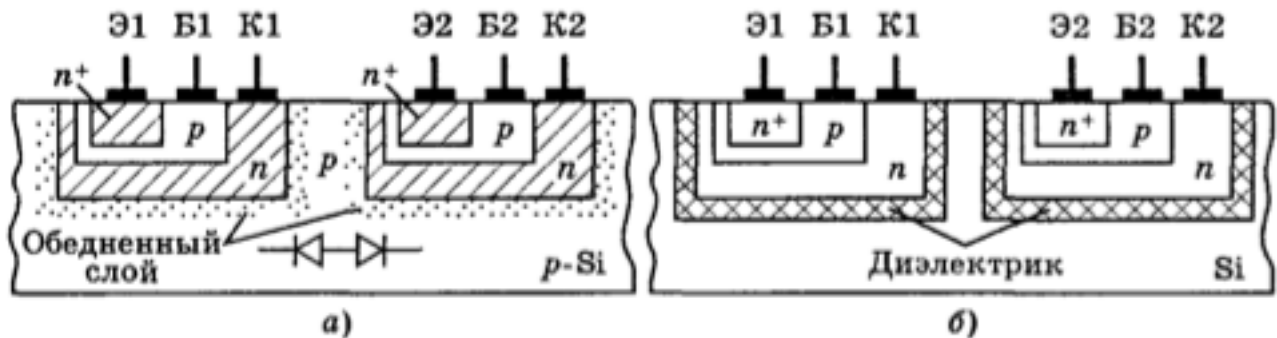


Рис. 7.3. Основные методы изоляции элементов ИС:  
а — с помощью р-п-переходов; б — с помощью диэлектрика

Вказані 2 типи ізоляції розрізняються не стільки питомим опором ізолюючого шару, скільки його структурою. Ізоляцію р-п переходом відносять до однофазного способу, оскільки матеріал використовується той самий – кремній.

Ясно, що ізол. Р-п переходом зводиться до створення двох зустрічно увімкнених діодів між елементами. Для того, щоб обидва діоди знаходились в зворотному зміщенні, на підкладку подають максимально від'ємний потенціал від джерела живлення ІС. Недоліки – наявність зворотних струмів в р-п переходах і наявність бар'єрних ємностей.

Методи створення переходів: В планарній технології в свій час використовувались методи потрійної дифузії і зустрічної(двосторонньої) дифузії.

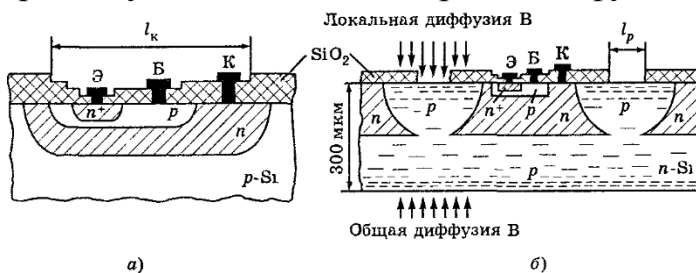


Рис. 7.4. Возможные варианты изоляции элементов с помощью переходов:  
а — метод тройной диффузии ( $l_k$  — размер окна под коллекторную диффузию); б — метод встречной (двусторонней) диффузии ( $l_p$  — размер окна под разделительную диффузию)

колекторного переходу виходить порівняно низькою. Крім того складна і сама технологія потрійної дифузії.

В методі подвійної дифузії ізоляції добиваються загальною дифузією акцепторної домішки через нижню поверхню пластини n-типу і локальної дифузії тієї ж домішки через верхню поверхню. Глибина обох дифузій – половина товщини, тому області зникаються. В верхній частині пластини утворюються «острівки» вихідного кремнію n-типу, які є колекторними шарами транзисторів. В даному методі колекторний шар виявляється однорідним. Основний недолік – неоцідність проволити глибоку дифузію, а також довгий час дифузії, що економічно не вигідно. Крім того, через глибоку дифузію протяжність ізолюючих р-шарів на поверхні

В методі потрійної дифузії колекторний шар, що отримують на 1-й дифузії, являється неоднорідним: концентрація домішки зростає від дна до поверхні. Тому на границі з базовим шаром концентрація домішок виявляється досить великою і відповідно пробивна напруга

виявляється порядку товщини пластини – зменшується ефективність використання площі пластини.

На сьогодні замість монолітної пластини  $n$ -типу використовують тонкий епітаксійний  $n$ -шар, вирощений на підкладці. В даному випадку проблема ізоляції суттєво спрощується: дифузія, що забезпечує утворення колекторних «островків» проводиться тільки через одну(верхню) поверхню пластини на глибину, рівну товщині епітаксійного шару. При такій малій глибині час дифузії не перевищує 2-3 год., а уширення ізолюючих  $p$ -шарів на поверхні в кілька разів зменшується. При цьому коефіцієнт використання площі стає прийнятливим.

«Островки»  $n$ -типу, що залишились в епітаксійному шарі після роздільної дифузії, називають кишнями. В цих кишнях на наступних етапах технологічного процесу здійснюють необхідні елементи ІС, в першу чергу – транзистори. Транзистори, виготовлені в таких кишнях характерні великим горизонтальним опором колекторного шару. Зменшувати питомий опір епітаксійного шару нераціонально: при цьому зменшується пробивна напруга колекторного переходу і зростає колекторна ємність. Тому використовують так званий прихований  $n$ -шар, розміщений на дні кишені.

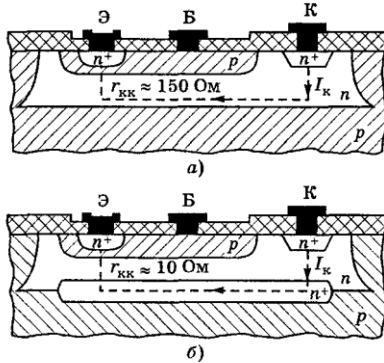


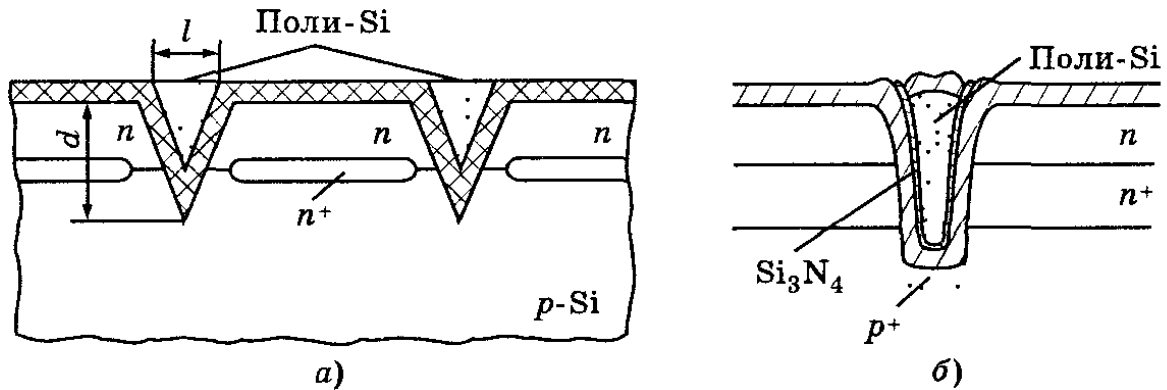
Рис. 7.6. Структура інтегрального  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора: а — без прихованого шару, б — з прихованим  $n$ -шаром

Прихований шар отримують дифузією, яка проводиться до нарощування епітаксійного шару. Під час епітаксії донорні атоми прихованого шару під дією високої температури дифундують в наростаючий епітаксійний  $n$ -шар. Внаслідок цього прихований шар частково розміщений в епітаксійному і дно кишені в цьому місці виявляється припіднятим на кілька мікрон. Для того, щоб попередити надмірне поширення донорів з прихованого шару в епітаксійний вибирають для прихованого шару дифузанти з порівняно малим коефіцієнтом дифузії. Використання прихованого шару забезпечує не тільки менший опір колектора, але і великий інверсний

коефіцієнт підсилення транзистора і менший надлишковий заряд в колекторному шарі, що накопичується в режимі подвійної інжекції. Роздільна дифузія в епітаксійному шарі являється в наш час найбільш простим і поширеним варіантом ізоляції  $p$ - $n$  переходом. Проте також використовують і більш складні варіанти – ізоляція колекторної дифузії.

## 10.2. Особливості ізоляції за допомогою V-канавок.

В даному методі замість наскрізного прокислення епітаксійного шару використовують його наскрізне протравлення методом анізотропного травлення.



**Рис. 7.11.** Метод ізоляції V-канавками (а) и U-канавками (б)

При цьому поверхня кристалу повинна мати орієнтацію(100), а травлення йде по площині (111). Розміри вікна в масці роблять такими, що грані (111) «сходяться» трохи нижче границі епітаксійного шару і утворюють V-подібні канавки. Залежність між шириною і глибиною канавки строго визначена  $l/d = \sqrt{2}$ . При глибині 4-5мкм ширина складе всього 6-7мкм, тобто втрати площі під ізоляцію виходять досить незначними. Недоліком методу є необхідність використання площини (100), якій властива підвищена густина поверхневих дефектів. Рельєф, отриманий в результаті травлення, окисляється, як і при епiк-процесі. Однак, на відміну від епiк-процесу, наступне напилення полікремнію має на меті лише вирівняти рельєф поверхні для полегшення металічної розводки. Для цього достатньо заповнити полі кремнієм тільки канавки.

### 10.3. Технологія ЕПІК ізоляції

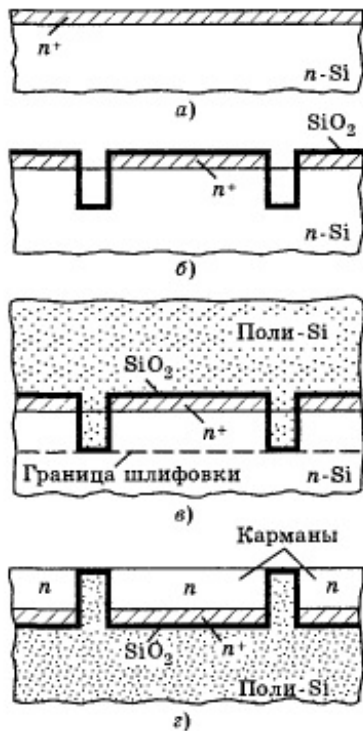
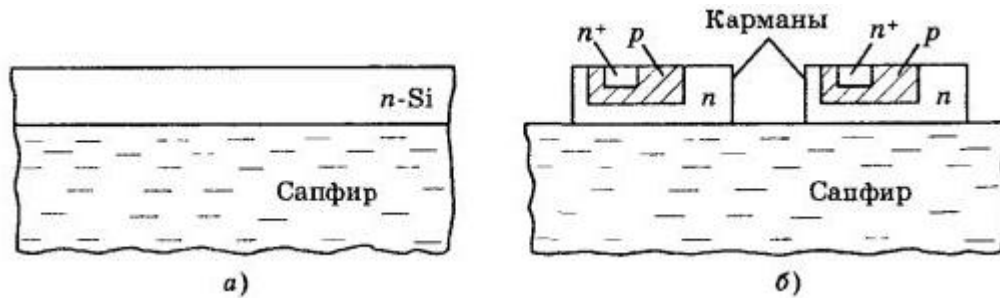


Рис. 7.8. Метод диэлектрической изоляции (эпик-процесс):  
 а — исходная структура;  
 б — травление канавок и окисление; в — напыление поликристаллического кремния; г — конечная структура (карманы со скрытым  $n^+$ -слоем)

Epitaxial passivated integrated circuit - інтегральна схема (IC) з використанням технології ЕПІК ізоляції (діелектрична ізоляція, виготовлена методом епітаксії). Етапи цього процесу показані на *рис.7.8*. Вихідна пластина кремнію  $n$ -типу покривається тонким (2-3 мкм) епітаксійним шаром  $n^+$ -типу (*рис.7.8,а*). Через маску в пластині витравлюють канавки глибиною 10-15 мкм, після чого всю рельєфну поверхню окислюють (*рис.7.8,б*). Далі на окислену рельєфну поверхню напилують товстий (200-300 мкм) шар полікристалічного кремнію (*рис.7.8,в*). Після цього вихідну пластину  $n$ -типу зішлифовують на всю товщину аж до дна канавок. У результаті виходять кишень  $n$ -типу (з прихованим  $n^+$ -шаром), розташовані вже на полікристалічній підкладці (*рис.7.8,г*). Ізоляція елементів забезпечується окисним шаром  $\text{SiO}_2$ . Основну складність в епик-процесі представляє прецизійне шліфування монокристалічної пластини: при товщині зішлифованого шару 200-300 мкм похибка шліфування по всій поверхні повинна лежати в межах 1-2 мкм. Якщо на 2-му етапі (*рис. 7.8, б*) напилувати не напівпровідниковий шар (полікристалічний кремній), а діелектричний - кераміку, виходить варіант керамічної ізоляції. Цей варіант забезпечує кращу гальванічну і ємнісну «розв'язку» елементів, але він складніший і дорожчий.



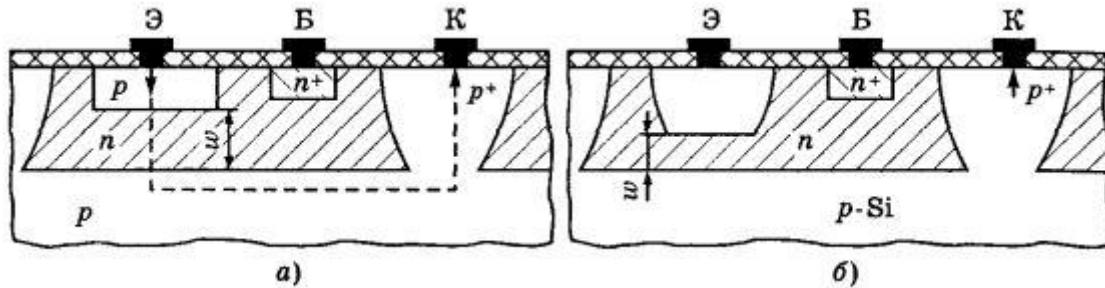
#### 10.4. Особливості створення структур кремнію на ізоляторі.



Велике розповсюдження отримала так звана технологія кремній на сапфірі (КНС, Silicon On Sapphire – SOS). Її основні етапи показані на рисунку. Сапфір має таку ж структуру кристалічної решітки, як і кремній. Тому на сапфіровій пластині (підкладці) можна наростити епітаксіальний шар кремнію (лівий рис.), а потім протравити цей шар наскрізь до сапфіра, так щоб утворились кремнієві «острівці-кармани» для майбутніх елементів ІС (правий рис.). Ці кармани з нижньої сторони ізолювані один від одного сапфіром – діелектриком, а з бокових сторін - повітрям. Тому технологію КНС часто відносять до класу *повітряної ізоляції*. Недоліком такого методу є рельєфність поверхні, що ускладнює здійснення металічної розводки.

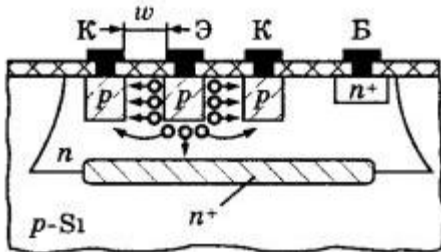
### 11.1. Транзистори (паразитні, горизонтальні та вертикальні).

Усі існуючі варіанти інтегральних п-н-п-транзисторів суттєво гірші від н-п-н-транзисторів по коефіцієнту та граничній частоті. Раніше, у якості п-н-п-



транзисторів використовувались п-н-п-структури, що складались з бази, колектора та підкладки. (рис. «а» вгорі). Їх називають **паразитними**. Створення такого транзистора не вимагає додаткових технологічних операцій, проте його параметри є дуже низькі за рахунок широкої бази (порівняно з глибиною епітаксiального шару) та низьким ступенем легування емітера (товщина бази близько 10 мкм, що відповідає граничній частоті в 1-2 МГц). Наступним недоліком є те, що розділювальний  $p^+$ -шар з'єднаний з підкладкою, а через неї з іншими розділювальними шарами, за рахунок чого, колектори є з'єднані один з одним, що сильно обмежує сферу їх застосування. Використовуючи глибоку дифузію акцепторів, можна отримати меншу товщину бази та покращити параметри (рис «б» вгорі).

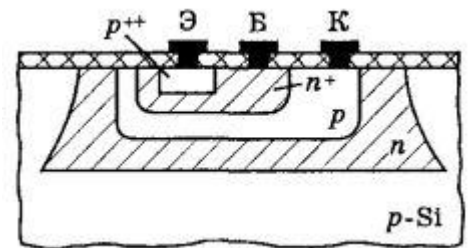
Зараз основним варіантом п-н-п-транзистора є **горизонтальний** (рис. зліва).



Емітерний та колекторний шари отримуються на етапі базової дифузії, причому колекторний шар охоплює емітер з усіх сторін. Це дозволяє збирати інжектвані дірки з усіх бокових частин емітерного шару. Приповерхневі бокові ділянки  $p$ -шарів характеризуються підвищеною концентрацією примісу, що збільшує коефіцієнт інжекції. Оскільки

базова дифузія мала, ширину бази вдається зробити порядку 3-4 мкм. У результаті зростає коефіцієнт підсилення.

Даний транзистор є бездрейфовим, йому властива електрофізична симетрія, оскільки шари емітера та колектора однотипні, це означає, що пробивні напруги відповідних переходів є однаковими. Головні недоліки даного п-н-п-транзистора – відносно велика ширина бази та її однорідність. Їх можна уникнути використовуючи **вертикальну** структуру за рахунок додаткових технологічних операцій (рис. справа нижче): глибока дифузія  $p$ -шару і заключна дифузія  $p^{++}$ -шару (верхню, найбільш леговану частину  $p^+$ -шару треба травити до утворення  $p^{++}$ -шару, що ускладнює технологічний процес.



## 11.2. Багатоємітерні та багатоколекторні транзистори в МЕ. Їх топологія та додаткові можливості.

### Багатоємітерний транзистор

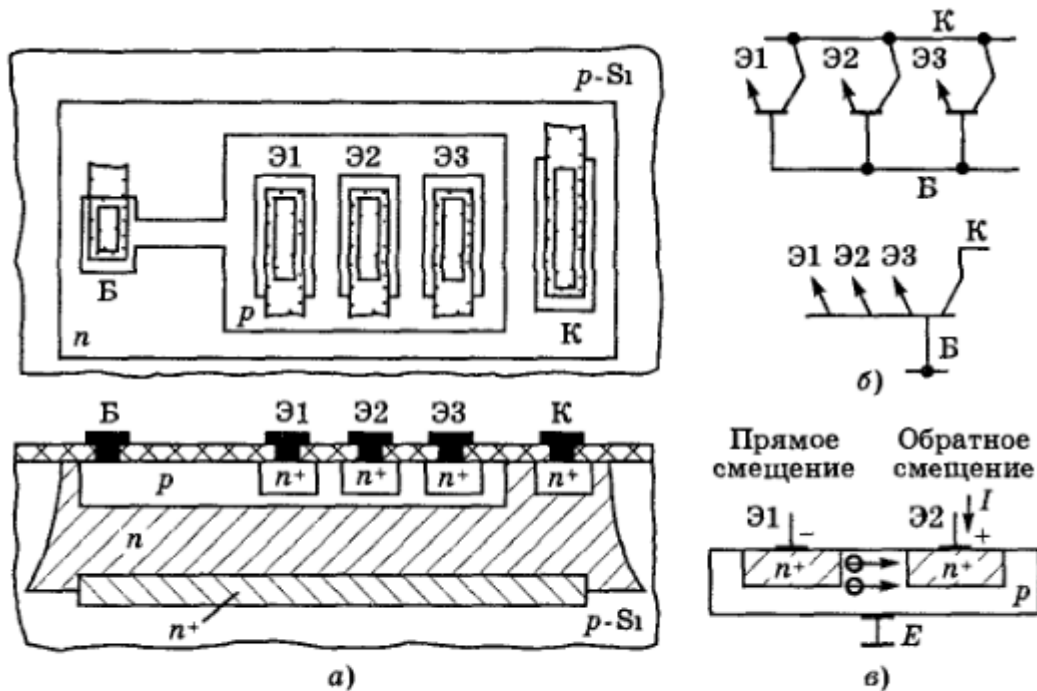


Рис. 7.16 Многоэмиттерный транзистор а — топология и структура, б — схемные модели, в — взаимодействие между смежными эмиттерами

Такі транзистори складають основу досить поширеного класу цифрових ІС – схеми ТТЛ. Кількість емітерів 5-8 і більше.

В першому наближенні БЕТ (Багатоємітерний транзистор) можна розглядати як множину окремих транзисторів зі з'єднаними базами і колекторами (рис 7.16, б). Особливості БЕТ як єдиної структури наступні (7.16, в).

**По-перше**, кожна пара суміжних емітерів разом з поділяючим їх  $p$ -шаром бази утворює *горизонтальний* транзистор типу  $n^+p\text{-}n^+$ . Якщо на одному з емітерів діє пряма напруга, а на іншому обернена, то перший буде інжектувати електрони, а другий буде збирати ті з них, які інжектуються через бічну поверхню емітера і пройшли без рекомбінації відстань між емітерами. Такий *транзисторний ефект* є для БЕТ паразитним: в зворотньоозміщеному переході, який повинен бути замкненим, буде протікати струм. Щоб запобігти горизонтальний транзисторний ефект, відстань між емітерами повинна перевищувати дифузійну довжину носіїв у шарі бази. Якщо транзистор легований золотом то дифузійна довжина не перевищує 2-3 мкм і практично виявляється достатнім відстань 10-15 мкм.

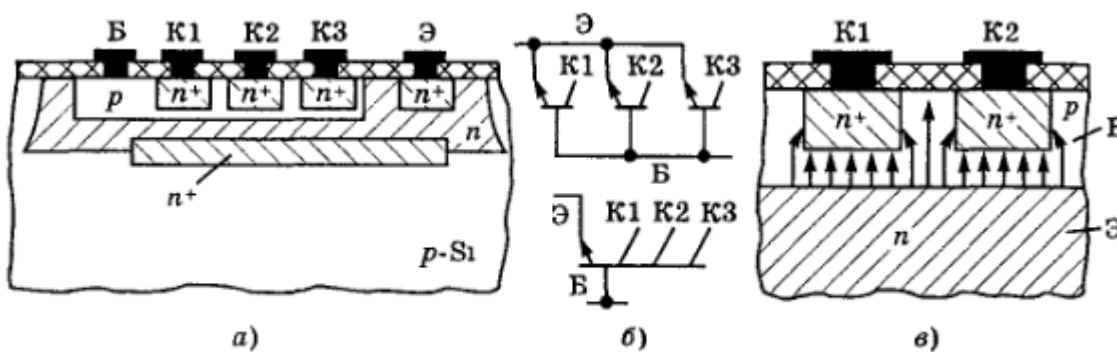
**По-друге**, важливо, щоб БЕТ мав якнайменший інверсійний коефіцієнт передачі струму. В протилежному випадку в інверсійному режимі, коли емітери знаходяться під зворотною напругою, а колектор від прямою, носії, які інжектуються колектором, будуть в значній мірі досягати емітерів, і в колі останніх,

незважаючи на їх зворотне зміщення, буде протікати струм – паразитний ефект, аналогічний описаному вище.

Інверсний коефіцієнт передачі завжди менше нормального через відмінності в ступені легування і в площинах емітера і колектора. Для того щоб додатково зменшити інверсійний коефіцієнт в БЕТ, штучно збільшують опір пасивної бази, видаляючи омичний базовий контакт від активної області транзистора (7.16 а). Інжектування електронів з колектора в активну область бази буде незначним і паразитні струми через емітери будуть практично відсутні.

### **Багатоколекторні транзистори**

Відмінність полягає лише у використанні структури. Можна сказати, що БКТ (багатоколекторні транзистори) – це БЕТ, які використовуються в інверсному



**Рис. 7.17. Многоколлекторный транзистор: а — структура; б — схемные модели; в — траектория движения инжектированных носителей**

режимі. Спільним емітером є епітаксійний n-шар, а колекторами слугують високолегованні  $n^+$ -шари малих розмірів. Еквівалентна схема БКТ (7,17 б).

Головною проблемою при розробці БКТ є збільшення нормального коефіцієнта передачі струму від спільного n-емітера до кожного з  $n^+$ -колекторів. Ця проблема - обернена тій, що розглядалась у випадку з БЕТ, коли коефіцієнт від n-шару до  $n^+$ -шарам зменшували.

В даному випадку треба, щоб скритий  $n^+$ -шар розміщувався як можна ближче к базовому або контактував з ним. Тоді цей високолегований шар, будучи емітером, забезпечить високий коефіцієнт інжекції. Для підвищення коефіцієнта переноса треба розміщувати  $n^+$ -колектори як можна ближче один до одного, зменшуючи тим самим площу пасивної ділянки бази.

На рисунку 7,17 в показані траєкторії руху інжектованих носіїв в базі. Видно, що середня довжина траєкторії носіїв значно перевищує товщину активної бази. Тому середній час дифузії буде значно меншим. Ніж у БЕТ і окремих транзисторів. Різниця у часі прольоту ще більше, оскільки в БКТ поле бази для інжектованих носіїв є не прискорюючим а гальмуючим.



## Статичні характеристики польового транзистора

Якщо подана напруга  $U_{CB}$  то через канал протікає струм і поверхня каналу, що прилягає до збідненого шару вже не буде екіпотенціальною. Напруга на р-п переході змінюватиметься вздовж осі  $x$ , зростаючи поблизу стоку. Отже і ширина збідненого шару буде змінюватися від витоку до стоку (див. рис 11.2). Коли різниця потенціалів  $U_{CB} - U_{3B}$  (де  $U_{3B} < 0$ ) стане рівною напрузі відсічки  $U_{3B\text{відс}}$ , товщина каналу біля стоку стане рівною нулю, тобто утворюється «горловина каналу». На відміну від випадку  $U_{CB} = U_{3B\text{відс}}$  це не призводить до відсічки струму, але відбувається відсічка

його приростів – насичення струму. Статичні характеристики наведені на рис 11.3.

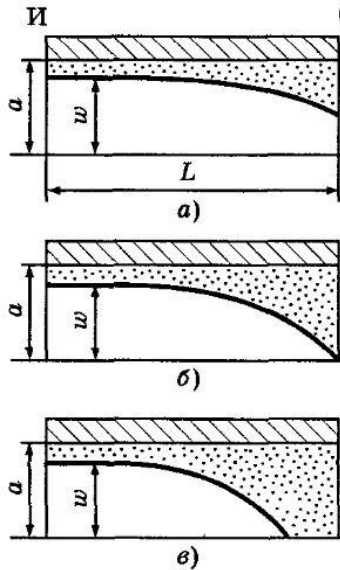


Рис 11.2 переріз каналу транзистора а) – ненасичений режим б) – на границі насичення в) – в режимі насичення

Аналітичні вирази для ВАХ:

$$I_C = \frac{1}{R_{0\text{мін}}} \left[ U_{CB} + \frac{2}{3} \frac{U_{3B}^{3/2} - (U_{3B} + U_{CB})^{3/2}}{U_{3B\text{відс}}^{1/2}} \right] \quad - \text{ на крутій ділянці}$$

$$I_C = \frac{1}{R_{0\text{мін}}} \left[ \frac{1}{3} U_{3B\text{відс}} - U_{3B} \left( 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{3B}}{U_{3B\text{відс}}}} \right) \right] \quad - \text{ на пологій ділянці}$$

де  $R_{0\text{мін}}$  - опір каналу при  $U_{3B} = 0$

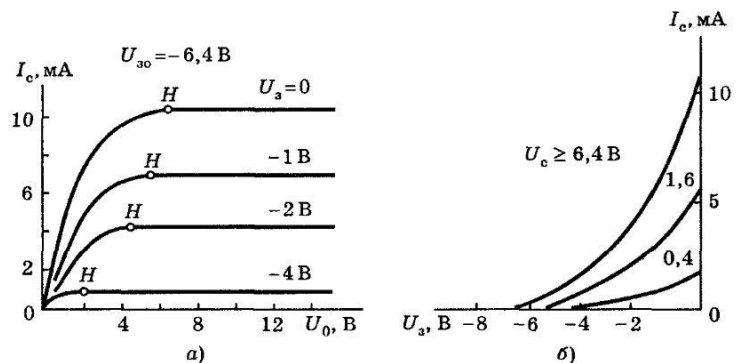


Рис 11.3 Статичні характеристики польового транзистора.

а) – вихідні, б) – передаточні



## 11.4. МДН транзистори

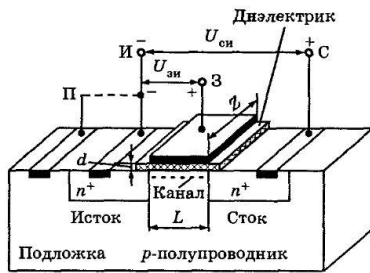


Рис 11.4 Структура МДН транзистора з індукованим  $n$  - каналом

Металічний електрод, що створює ефект поля називають затвором, два інші – витоком і стоком. Стік – той, на який поступають робочі носії каналу. Витік зазвичай з'єднують із підкладкою.

### Принцип дії

Нехай рівноважний потенціал поверхні рівний нулю ( $\phi_{s0} = 0$ ). Нехай затвор з'єднаний зі стоком, тобто  $U_{зс} = 0$ . При цьому канал відсутній і на шляху між стоком та витоком – два зустрічно ввімкнених  $p-n^+$  переходи. Тому при подачі напруги  $U_{св}$  струм у колі буде надзвичайно малим.

Якщо подати на затвор від'ємну напругу, то приповерхневий шар збагатиться дірками; при цьому струм в робочому колі мало зміниться. Якщо ж подавати на затвор  $U_{зс} > 0$ , то спочатку утворюється збіднений шар (об'ємний заряд акцепторів), а потім – інверсний шар електронів, тобто провідний канал. Після цього струм стоку займає сталі значення, що залежить від напруги на затворі. Це – робочий режим МДН транзистора. Оскільки вхідний струм надзвичайно малий, то отримуємо значне підсилення за потужністю.

Канали, що відсутні в рівноважному стані і утворюються під дією зовнішньої напруги, називають індукованими.

$U_0$  - порогова напруга (напруга утворення каналу)

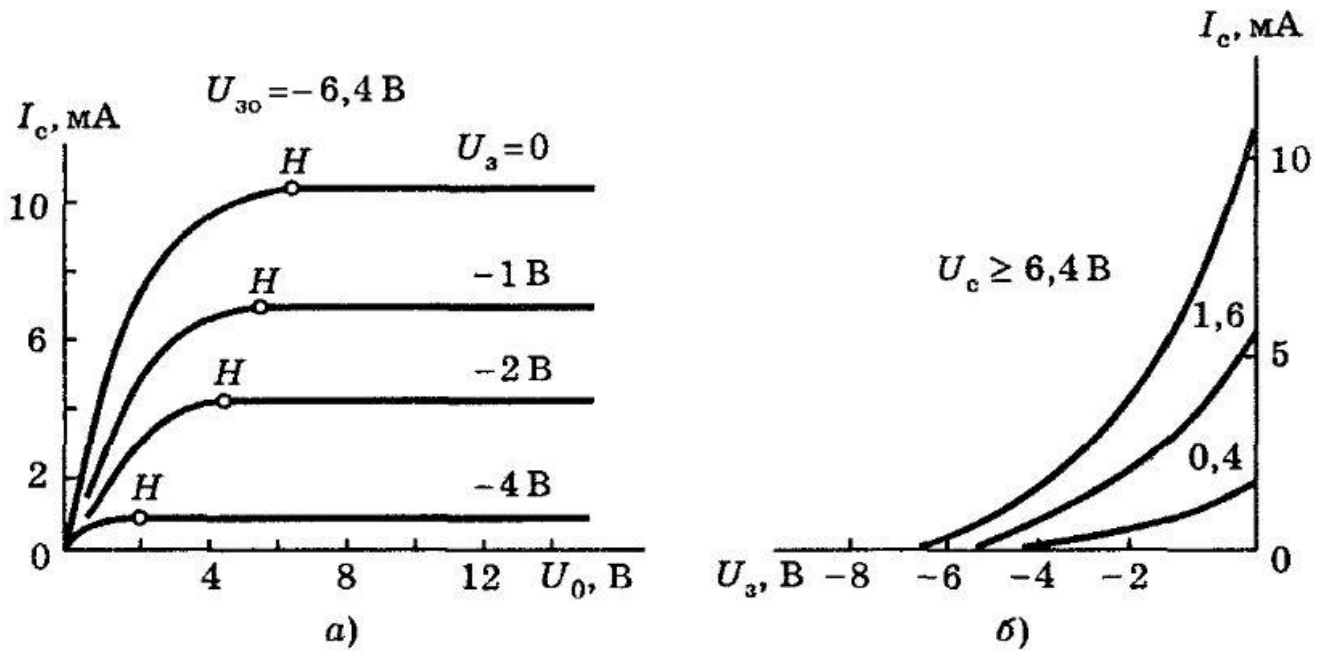
$L$  - довжина каналу (відстань між шарами витоку і стоку)

$Z$  - ширина каналу (дорівнює протяжності шарів витоку і стоку)

Якщо підкладка  $n$  - типу, а шари витоку і стоку -  $p^+$  - типу, то отримаємо МДН транзистор з індукованим  $p$  - каналом. Для нього робочі напруги:  $U_0 < 0, U_{зс} < 0, U_{св} < 0$

Транзистори, в яких канал існує при нульовій напрузі на затворі називаються транзисторами з вбудованим каналом (може утворюватись напр. за рахунок позитивного заряду в окислі (для транзисторів з  $n$  - каналом)). Для них замість порогової напруги вводиться *напруга відсічки* (при якому електрони рівноважного інверсійного шару відштовхуються від поверхні і вбудований шар зникає).

## Статичні характеристики



Якщо напруга  $U_{CB} = 0$ , то поверхня  $n/p$  – екіпотенціальна, поле в діелектрику однорідне і товщина утвореного каналу  $h$  – однакова на всій довжині (рис 11.5 а). Якщо ж  $U_{CB} > 0$ , то протікає струм і потенціал поверхні зростає від витoku до стоку (різниця потенціалів між затвором і поверхнею в напрямку стоку спадає). Тому переріз каналу поблизу точки  $x = L$  зменшується (рис 11.5 б).

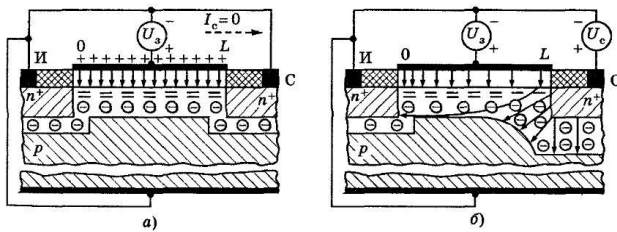


Рис 11.5 Розподіл поля в МДН транзисторі при нульовій (а) та додатній (б) напрузі на стоку

При певній критичній напрузі на стоці (напрузі насичення) різниця потенціалів між затвором і поверхнею в точці  $x = L$  стає рівною пороговій напрузі.

Утворюється «горловина» каналу. (див. рис 4.6 а). Напруга насичення має вигляд:

$$U_{CH} = U_{3B} - U_0$$

При напругах  $U_{CB} > U_{CH}$  шар об'ємного заряду, що до цього часу відділявся від поверхні каналом «виходить на поверхню» на ділянці  $\Delta L$ , а «горловина» каналу зсувається відповідно в точку  $L'$  (рис 11.6, б). Внаслідок цього відбувається скорочення каналу на величину  $\Delta L$ ;

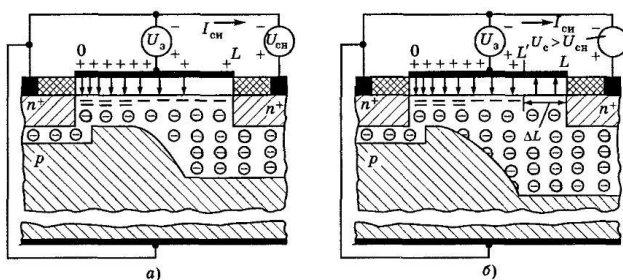


Рис 11.6 Розподіл поля в МДН транзисторі на границі насичення (а) та в області насичення (б)



потенціал «горловини» в точці  $L$  зберігає значення  $U_{CH}$ , яке було на початку насичення.

$\Delta L$  - при поверхнева ширина об'ємного заряду

$$\Delta L \sim \sqrt{U_{CB} - U_{CH}}$$

Після утворення «горловини» каналу струм в робочому колі практично перестає залежати від напруги на стоці – настає насичення струму.

Апроксимаційний вираз для ВАХ можна записати у вигляді

$$I_C = b \left[ (U_{3B} - U_0) U_{CB} - 1/2 U_{CB}^2 \right]$$

де  $b$  - питома крутість МДН транзистора:  $b = \mu C_0 \frac{Z}{L} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{d} \frac{Z}{L}$

$\mu$  - при поверхнева рухливість носіїв,  $Z$  - ширина каналу

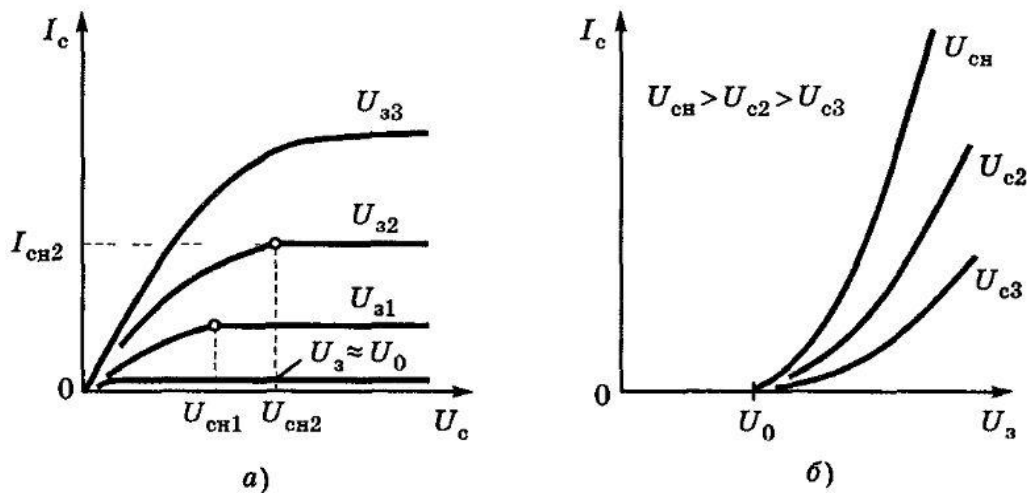


Рис 11.7 Статичні характеристики МДН транзистора:

а – вихідні; б - передаточні

### 11.5. Паразитні ємності МДН-транзисторів.

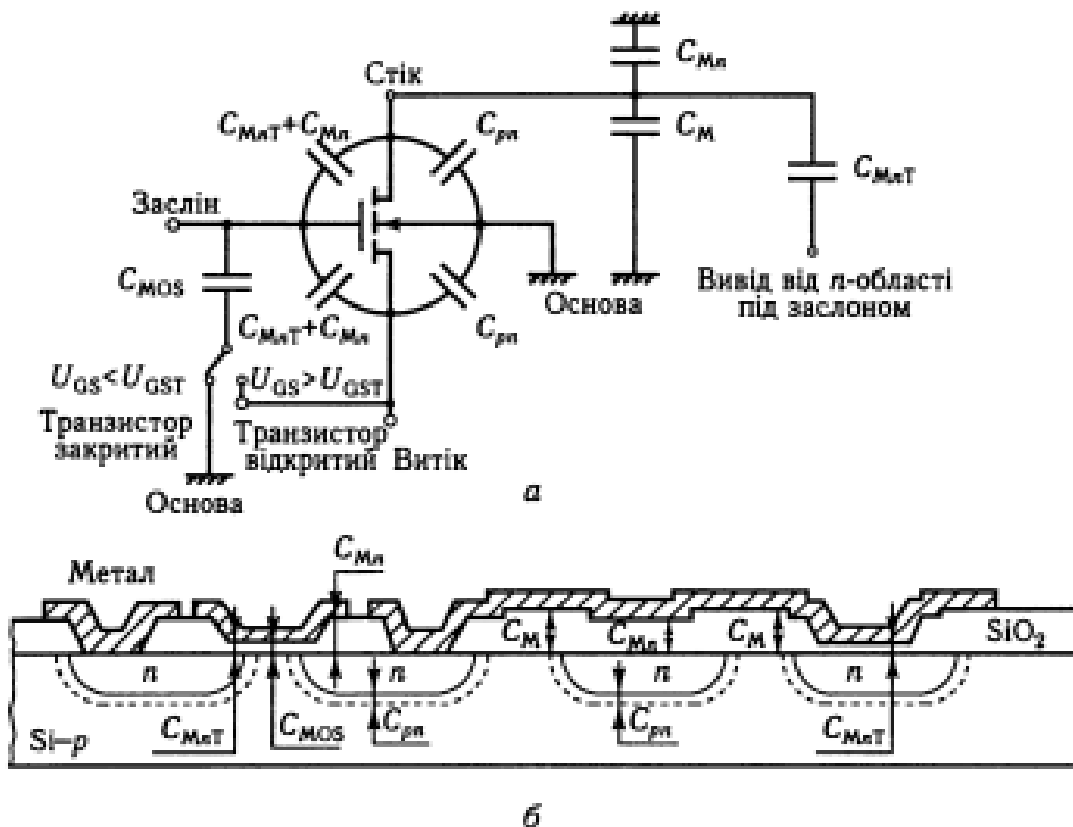


Рис. 6.36. Еквівалентна схема всіх ємностей МДН-транзистора (а) та розміщення відповідних ємностей у структурі інтегрованої мікросхеми (б)

Визначаючи параметри схем на МДН транзисторах, враховують не тільки власні ємності МДН-структури, а й багато інших, які виникають при конструюванні та виробництві МДН-інтегрованих мікросхем.

**Ємність p-n переходу**

$$C_{pn} = C_{0pn} S_{pn}$$

де  $C_{0pn}$  – питома ємність p-n переходу і залежить від напруги зовнішнього переходу;  $S_{pn}$  – площа p-n переходу. Ця ємність є однією з найбільших паразитних ємностей.

Ємність між металевими провідниками і силіцієвою основою в пасивних областях структури (за межами МДН-транзистора)  $C_M$ . Вона подібна до власної ємності транзистора  $C_{MOS}$ . Оскільки шар захисного діелектрика в кілька разів товщий за шар підзаслінного діелектрика, то питома ємність  $C_{0M}$  буде в стількиж разів менша за ємність  $C_{0MOS}$ . Ємність  $C_{0M}$  практично не залежить від напруги металізації доти, доки напруга не досягне значення порогової напруги паразитного транзистора  $U_{GST\text{ пар}}$ , за якої настає режим інверсії.

$$C_M = C_{0M} S_M$$

де  $S_M$  – площа провідників.

**Ємність метал-тонкий діелектрик - n-область (p-область)  $C_{MnT}$  ( $C_{MnT}$ )**

Вона виникає у разі перекриття тонким підзаслінним діелектриком і відповідно заслоном областей витоку і стоку і називається ємністю перекриття. Це перекриття

спричинює дифузія бічна при творенні витоку та стоку. Питома ємність  $C_{MnT}$  буде такою самою, як питома ємність  $C_{MOS}$  за нульового зміщення. Проте  $C_{0MnT}$  не залежить від напруги на заслоні.

**Ємність метал-товстий(захисний) діелектрик - n-область(p-область)**  
 $C_{Mn}(C_{Mp})$

Питома ємність  $C_{0Mn}(C_{0Mp})$  буде трохи більшою за  $C_{0M}$ , оскільки шар захисного діелектрика над n(p)-областями буде трохи меншим, ніж такий самий шар під металізацією. Ємності  $C_{Mn}(C_{Mp})$  розраховують так само як і інші ємності.

### 11.6. Засоби підвищення швидкодії МДН-транзисторів. Засоби зменшення порогової напруги.

МОН-транзистори займають на кристалі мікросхеми в 6-9 разів меншу площу, ніж транзистори, які використовуються в ТТЛ за рахунок спрощення топології, так, найпростіший тип транзистора, з індукованим каналом, потребує всього однієї операції легування і однієї - металізації. В англomовній літературі такий тип називається «збагачений канал». Це дозволило добитися високого ступеня інтеграції та створити мікропроцесори (процесори зібрані в одній мікросхемі). Однак, схеми на транзисторах з індукованим каналом вимагають дуже високої напруги живлення (27 вольт для типових р-МОН структур, і 12 вольт для типових n-МОН), і володіють невисокою швидкодією, затримка перемикання для р-МОН схем становила десятки, в кращому випадку - одиниці мікросекунд, а для n-МОН - сотні наносекунд. Збільшити швидкодію з одночасним зниженням напруги живлення вдалося застосуванням транзисторів з вбудованим каналом, що працює в режимі збіднення. Такі транзистори вимагають на одну операцію легування більше, але дозволили n-МОН схемам працювати від одного джерела напругою 5 вольт.

Подальше підвищення швидкодії було пов'язано з відмовою від металевих затворів і переходом на затвори з полікристалічного кремнію. Щоб ще збільшити швидкодію, для ізоляції затвора від каналу були використані діелектрики з меншим коефіцієнтом діелектричної проникності, ніж в оксиду кремнію, тому польові транзистори сучасних цифрових НВІС вже неправомірно називати МОН-транзисторами. З метою радикального зниження енергоспоживання в одному логічному елементі можуть застосовуватися транзистори обох типів провідності, як з каналом n-типу, так і з каналом р-типу. ("комплементарна"). На відміну від схем на одному типі провідності, КМОН схеми практично не споживають струму в статичному режимі, так як в них в ланцюжку послідовно з'єднаних транзисторів хоча б один завжди закритий, і лише під час перехідного процесу всі транзистори виявляються ненадовго відкритими. Однак, КМОН структури вимагають більшого числа технологічних операцій при виготовленні, що спочатку обмежувало досяжну ступінь інтеграції (досить довго за цим параметром лідирували n-МОН структури).

У деяких випадках для покращення схемних параметрів пристроїв на МДН-транзисторах, коли потрібно отримати модифіковану порогову напругу, близьку до нуля і тим самим підвищити навантажувальну здатність, використовують конструкції, в яких  $\xi \leq 1$ , тобто передбачають перекриття областей об'ємного заряду стоку і витоку. В результаті транзистор завжди перебуває у частково відкритому стані і крізь нього проходить струм. Також потрібно зменшувати області стоку і витоку.

### 11.7. Елементи логіки на основі МДН-транзисторів.

З польових транзисторів найбільше застосування при створенні логічних елементів отримали **МДП - транзистори з індукованим каналом**. Це пояснюється однаковою полярністю напруг необхідних для управління і живлення цих транзисторів, і отже, простим рішенням завдання послідовного з'єднання елементів на їх основі.

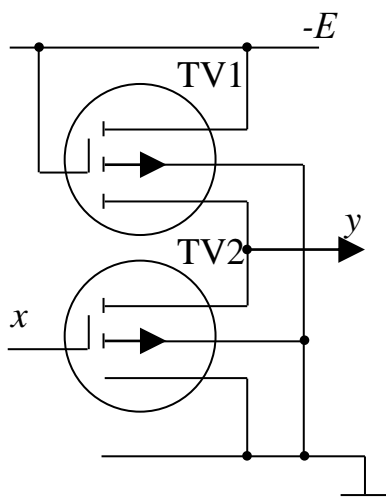
Технологія отримання МДП - транзисторів простіше, ніж біполярний. На той же в якості пасивного елемента - резистора - тут використовують опір проводить каналу МДП - транзистора. Це дозволяє виконувати логічні МДП - мікросхеми на базі тільки транзисторних структур, що ще більш спрощує і здешевлює їх технологію порівняно з схемами на біполярних транзисторах.

У кристалі напівпровідники МДП - транзистор займає менше місця, ніж біполярний. Тому МДП - транзистори дозволяють створювати мікросхеми з високим ступенем інтеграції для вирішення більш складних функціональних завдань. **Вони споживають меншу потужність (менше 1 мкВт).**

**Недолік** - вони є менш швидкодіючі порівняно зі схемами на біполярних транзисторах.

Логічний елемент НЕ - інвертор, являє собою схему каскаду з ключовим режимом роботи транзистора. У інтегральних мікросхемах на МДП - транзисторах функцію навантаження виконує також МДП - транзистор.

#### Елемент НЕ



$$y = \bar{x}$$

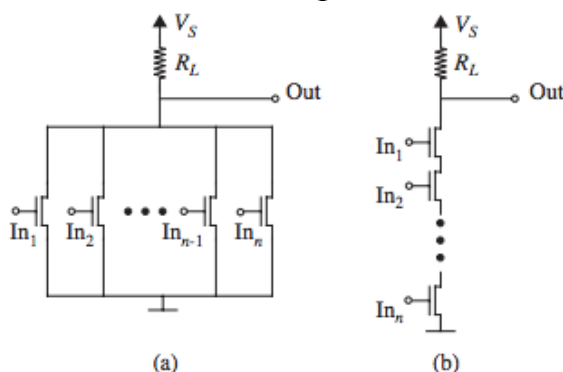
TV2 - керуючий; TV1 - навантажувальний виконані на МДП - транзисторах з індукованим каналом р - типу.

Напруга живлення має негативну полярність, у зв'язку з чим стан логічної одиниці ( $y = 1$ ) тут відповідає негативний потенціал (негативна логіка). Логічному нулю відповідає нульове вихідна напруга.

При  $x = 1$  вхідна напруга перевищує граничне й TV2 відкритий, падіння напруги на ньому мало. TV1 - також відкритий, так як між його затвором і стоком прикладається напруга  $E - \Delta U_{TV2}$ , що перевищує порогове напругу.

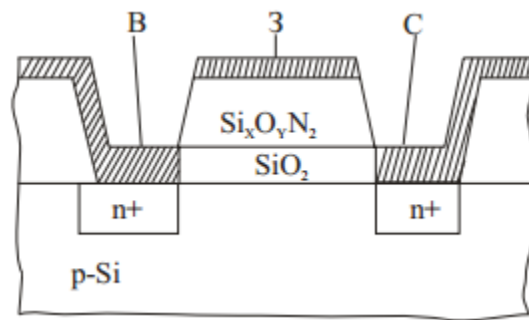
При  $x = 0$  TV2 і TV1 - закриті, через обидва транзистора протікає малий струм, визначається закритим TV2.

FIGURE 6.22 Multiple-input NOR and NAND gates.



### 11.8. МНОН ТРАНЗИСТОР

МНОН транзистор відрізняється від звичайного тим, що на поверхні кремнію формується спочатку тонкий тунельний окисел товщиною менше 5нм в гарячому розчині азотної та надोцтової кислот в співвідношенні 1:1, а потім більш товстий пласт оксиду кремнію товщиною більше 100Å<sup>0</sup> височастотним магнетронним розпиленням кремнієвої мішені, легуючої бором в плазмі азоту. Коефіцієнт заломлення оксинітридної плівки повинен складати 1,78 – 2,1. Поверх двошарової плівки наноситься поліцидний затвор. Завдяки тунельному ефекту, носії заряду можуть проходити через тонкий пласт оксиду і накопичуватись на межі розділу SiO<sub>2</sub> - Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>N<sub>z</sub>. Цей від'ємний заряд і є носієм інформації, що зберігається МНОН транзистором.



Структура МНОН транзисторів.

Заряд записують, створеним під поліцидним затвором напруженістю електричного поля, достатньої для виникнення тунельної інжекції електронів через тонкий підзатворний діелектрик. На межі цього розділу можна створювати заряд любого знаку в залежності від напрямку електричного поля в підзатворній області. А наявність цього заряду відповідно формує рівень порогової напруги. Для МНОН транзистора з n-каналом від'ємний заряд на межі пластів підвищує порогову напругу, бо екранує дію позитивного зміщення на затворі, що відкриває канал транзистора. При цьому порогова напруга  $U_T$  зростає настільки високо (більше 10В), що відкрити канал позитивним зміщенням на затворі вже не можливо, цьому стану транзистора відповідає логічний рівень «1», а коли відкритий канал – логічний «0». При програмуванні запам'ятовуючого пристрою (ЗП) використовується напруга величиною 20В. Стійка робота транзистора складає до  $10^4 - 10^6$  перезаписів і є енергонезалежністю. Такий тип ПЗП називають ще РПЗП-ЕС (репрограмований ЗП з електричним стиранням).

### 11.9. HEMT (engl.) транзистор та його конструктивні особливості.

транзистор з високою рухливістю електронів. В ньому для створення каналу замість легованої області використовується гетероперехід (контакт двох напівпровідникових металів з різною шириною забороненої зони).

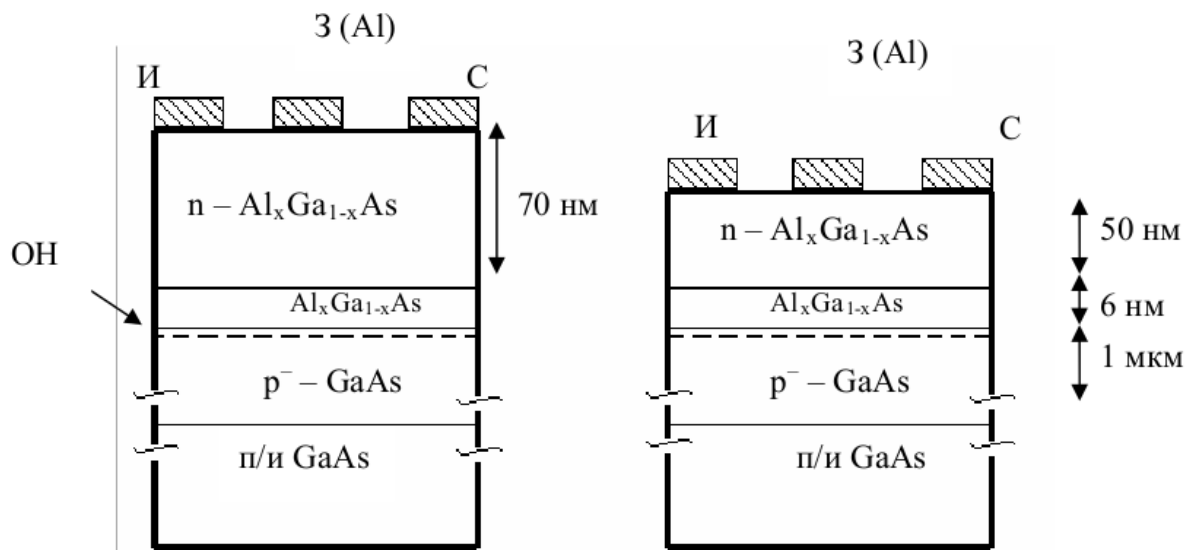
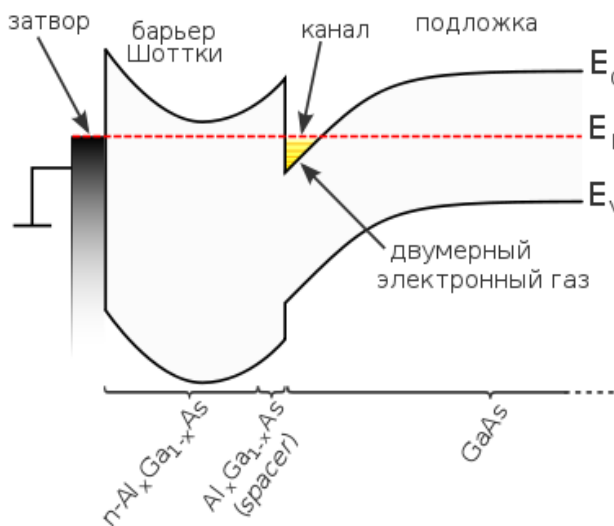


Рисунок 3. Примеры конструкции нормально открытого (слева) и нормально закрытого (справа) ГМЭП транзисторов.

(ОН – область накопления, И – виток, С – сток, З – затвор).



Електрони з великою рухливістю генеруються на гетеропереході в області контакту високолегованого шару n-типу з широкою забороненою зоною і нелегованого каналного шару з вузькою забороненою зоною без легуючих домішок.

Електрони, що утворились в тонкому шарі n-типу повністю переміщуються в шар GaAs, створюючи обіднення для AlGaAs, що викликане виникненням квантової ями в зоні провідності зі сторони нелегованого шару GaAs, де електрони

здатні швидко пересуватись без зіткнень з домішками. В результаті того, що електрони не можуть вийти з квантової ями, виникає дуже тонкий прошарок з високою концентрацією високорухливих електронів – двувимірний електронний газ.

**Принцип дії** транзистора аналогічний дії MeH-транзистора аналогічний принципу дії MeП-транзистора. Між металевим затвором і шаром AlGaAs під затвором виникає керуючий перехід метал-напівпровідник. Збіднена область цього переходу знаходиться, в основному, в шарах AlGaAs. Канал транзистора при  $U_{зв} < 0$  формується в шарі нелегованого GaAs на границі з гетеропереходом в області накопичення двувимірного електронного газу. Під дією керуючої напруги  $U_{зв}$  змінюється товщина збідненої області переходу метал-напівпровідник, концентрація

електронів в області накопичення і струм стоку. Електрони потрапляють в область накопичення з витоку. При достатньо великому по модулю від'ємному  $U_{зв}$  збіднена область розширюється настільки, що перекриває область накопичення електронів. Ток стоку при цьому припиняється.

У нормально закритому транзисторі внаслідок малої товщини верхнього шару AlGaAs при  $U_{зв} = 0$  провідний канал відсутній, оскільки область накопичення електронного газу перекрита областю керуючого переходу. Канал виникає при деякому додатньому  $U_{зв}$ , коли збіднена область керуючого переходу звужується настільки, що її нижня границя потрапляє в область накопичення електронів.

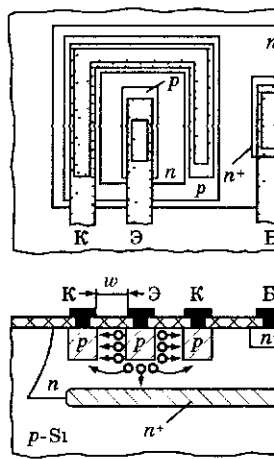
Завдяки великій рухливості електронів спостерігається лінійна залежність  $I_c$  від  $U_{gs}$ . **Важливою перевагою НЕМТ-транзисторів** в порівнянні з структурою MeH (метал-напівпровідник) транзисторів є менша густина поверхневих станів на границі меж AlGaAs та діелектриком, внаслідок якої зменшується від'ємний поверхневий заряд і товщина збіднених областей в проміжках між витоком та затвором, а також затвором та стоком. Це дозволяє отримати менші паразитні опори збіднених областей без самосуміщення. Внаслідок більшої висоти бар'єра Шоткі для НЕМТ-транзистора можлива більша пряма напруга (до 0.8 В).



### 11.10. Горизонтальні та вертикальні транзистори

[http://kurs.ido.tpu.ru/courses/osn\\_elec/chapter\\_7/glv\\_7\\_page\\_1.html](http://kurs.ido.tpu.ru/courses/osn_elec/chapter_7/glv_7_page_1.html)

Основним структурним варіантом  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора являється горизонтальний  $p$ - $n$ - $p$ -транзистор (рис. 1). Він ізолюваний від інших елементів, має набагато кращі параметри, ніж паразитний  $p$ - $n$ - $p$ -транзистор, а його технологія повністю вписується в класичний технологічний цикл з розділовою дифузією.



Емітерний і колекторний шари отримуються на етапі базової дифузії, при чому, колекторний шар охоплює емітер зі всіх боків. Це дозволяє збирати інжектовані дірки зі всіх бокових частин емітерного шару. Околоповерхневі бокові ділянки  $p$ -шарів характерні підвищеною концентрацією домішки, що сприяє збільшенню коефіцієнта інжекції. Оскільки базова дифузія відносно дрібна (2-3 мкм), товщину бази (відстань між  $p$ -шарами) вдається зробити порядку 3-4 мкм. В результаті, гранична частота може складати до 20-40 МГц, а коефіцієнт підсилення – до 50.

Рис. 3. Горизонтальний  $p$ - $n$ - $p$ -транзистор (топология і структура)

З рис. 1 видно, що горизонтальний  $p$ - $n$ - $p$ -транзистор (як і паразитний) являється без дрейфовим, так як його база однорідна – епітаксціальний  $n$ -шар. Цей фактор разом з меншою рухомістю дірок значно погіршує частотні і перехідні властивості  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора навіть за тої ж товщини бази, що і у дрейфового  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора. З рис. 1 також видно, що для збільшення коефіцієнта передачі емітерного струму бажано, щоб площа донної частини емітерного шару була малою в порівнянні з площею бокових частин. Тобто, емітерний шар необхідно робити настільки вузьким, наскільки це можливо.

Варто підмітити, що горизонтальному  $p$ - $n$ - $p$ -транзистору властива електрофізична симетрія, так як шари емітера і колектора однотипні. Зокрема, це означає, що пробивні напруги емітерного і колекторного переходів однакові (30-50 В). Близькими виявляються також нормальний і інверсний коефіцієнти підсилення струму  $B_N$  і  $B_I$ .

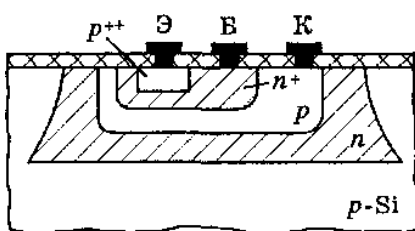


Рис. 4. Вертикальний  $p$ - $n$ - $p$ -

Горизонтальна структура дозволяє легко реалізувати багатоколекторний  $p$ - $n$ - $p$ -транзистор: достатньо розділити кільцевий  $p$ -колектор (рис. 1) на  $n$  частин і зробити окремі виводи від кожної частини.

Коефіцієнт підсилення на кожному з колекторів буде приблизно в  $n$  раз менше, ніж для єдиного

колектора, але всі колектори будуть діяти «синхронно», а навантаження, що приєднані до них, будуть ізольовані – «розв’язані» одне від іншого.

**Головні недоліки горизонтального** *p-n-p*-транзистора – відносно велика товщина бази та її однорідність. Ці недоліки можна усунути в вертикальній структурі (рис. 2), але ціною додаткових технологічних операцій. Відповідно до рис. 2, можна виділити дві такі операції: глибока дифузія *p*-шару і остаточна дифузія  $p^{++}$ -шару. Остання операція досить проблематична, так як для отримання  $p^{++}$ -шару необхідний акцепторний матеріал, у якого гранична розчинність більше, ніж у фосфору, що використовується для отримання  $n^+$ -шару. Оскільки подібні матеріали практично відсутні, верхню, найбільш леговану частину  $n^+$ -шару необхідно стравити до реалізації  $p^{++}$ -шару, що вносить додаткові складності в технологічний цикл.

## 12.1.-12.2. Плівкові резистори в мікроелектроніці. Питомий опір шару. Напівпровідникові резистори.

Спочатку найбільш популярними були дифузійні резистори. Пізніше почали використовувати іонно-імплантовані резистори. Частіше за все це полоска чи зигзагоподібна полоска базового шару з двома омичними контактами.

Опір полоски:  $R = \rho \frac{l}{ab} = R_S \frac{l}{b}$ , де  $b$  – ширина доріжки (обмежена можливостями фотолітографії, боковою дифузією а також допустимим розкидом);  $d$  – глибина занурення,  $R_S = \frac{\rho}{d}$  –

питомий опір н/п шару. Для н/п структур  $R_S = 200 \text{ Ом}/\blacksquare$ . Для зигзагоподібної форми:  $R = R_S [\frac{\sum L_i}{b} + n + 1.3]$ ,  $n$  – кількість «петель». Використовують низьколегований базовий шар.

Якщо потрібні номінали резисторів більше 50-60 кОм можна використовувати *пінч-транзистор*. В порівнянні зі звичайним транзистором він має меншу площу перерізу і більший питомий опір (оскільки використовується слабо легована частина р-шару).  $R_S = 10 \text{ кОм}/\blacksquare$ . Недоліками є: великий розкид номіналів (через сильний вплив товщини р-шару), великий температурний коефіцієнт, нелінійність вольт-амперної характеристики.

Покращити однорідність можна за рахунок відмови від дифузійних шарів і використання *йонноімплантовані*. Глибина шару виходить значно меншою. Температурний коефіцієнт є також меншим. Але суттєвим є розподіл домішок по глибині, тому  $R_S = \frac{\rho}{\int_0^B \sigma(x) dx} \approx 10 \text{ кОм}/\blacksquare$

Для резисторів низьких номіналів використовують сильно леговані емітерні шари  $R_S = 2 \text{ Ом}/\blacksquare$

Характерною особливістю будь-якого транзистора є наявність паразитної ємності відносно підкладки чи ізолюючого кармана. В найпростішому випадку такою паразитною ємністю є бар'єрна ємність переходу між робочим р-шаром і епітаксій ним н-шаром кармана. Зручно використовувати еквівалентні схеми.

Так,  $\tau = RC$ ,  $f_{\text{гр}} = \left(\frac{2\pi}{\omega}\right)^{-1} = \frac{1}{2\pi\tau}$ ,  $\omega = \frac{1}{\tau}$ ; наприклад, якщо  $C \approx 10 \text{ пФ}$ ,  $R = 1 \text{ кОм}$ , резистор виконує свою функцію до частот  $f_{\text{гр}} \approx 0.6 \text{ ГГц}$

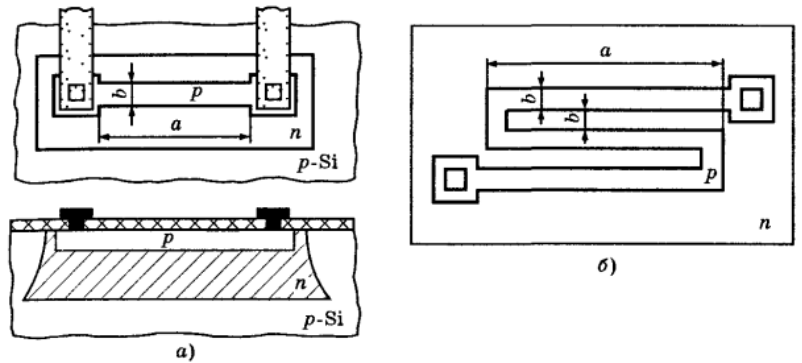


Рис. 7.35. Дифузійний резистор с полосковой (а) и с зигзагообразной конфигурацией (б)

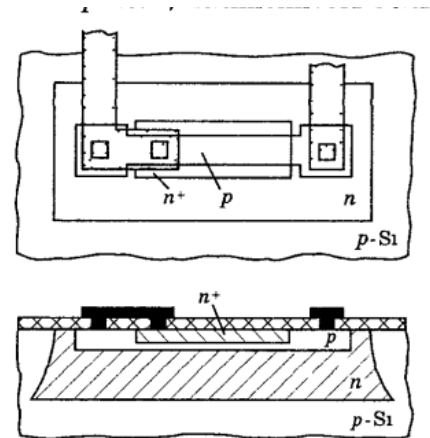
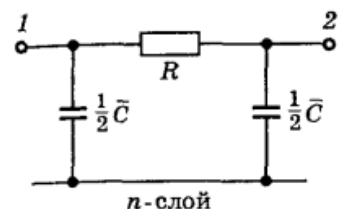
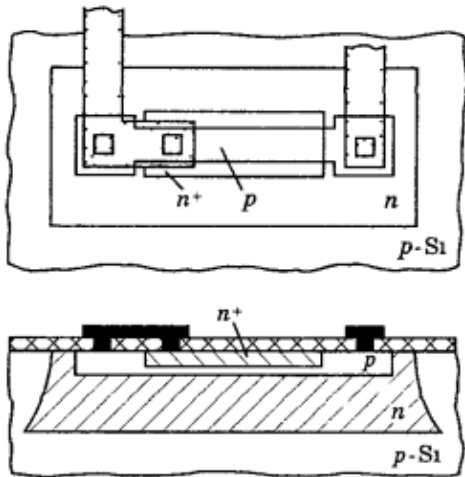


Рис. 7.36. Пинч-резистор



### 12.3. Пінч резистор. Його частотні властивості.

Якщо необхідні номінали опорів перевищують 20-30 кОм, можна використовувати так звані пінч-резистори. Структура пінч-резистора показана на малюнку 2.



У порівнянні з найпростішим резистором пінч-резистор має меншу площу перерізу і більший питомий опір (так як використовується донна, тобто слабо легована частина базового р-шару). Тому у пінч-резисторів питомий опір шару  $R_s$  зазвичай складає 2-5 кОм /мм і більше, залежно від товщини. При такому значенні  $R_s$  максимальний опір може досягати значень 200-300 кОм навіть при найпростішій смужковій конфігурації.

Недоліками пінч-резисторів є: більший розкид номіналів (до 50%) через сильний вплив зміни товщини р-шару, більший температурний коефіцієнт опору (0,3 - 0,5 % / °C) через меншу міру легування донної частини р-шару, нелінійність вольтамперної характеристики при напругах більше 1-1,5 В. Остання особливість впливає з аналогії між структурами пінч-резистора і польового транзистора. ВАХ пінч-резистора співпадає з ВАХ польового транзистора, якщо напругу на затворі останнього покласти рівну нулю (оскільки у пінч-резистора шари  $n^+$  і  $p$  з'єднані один з одним металізацією). Пробивна напруга пінч-резисторів визначається пробивною напругою емітерного переходу (зазвичай 5-7 В).

Якщо необхідні номінали опорів становлять 100 Ом і менше, то використовувати базовий шар недоцільно, оскільки ширина резистора повинна бути менше його довжини, що конструктивно важко здійснити. Для отримання резисторів з малими номіналами опорів використовують низькоомний емітерний шар. При значеннях  $R_s = 5-15$  Ом /мм, властивих цьому шару, вдається отримати мінімальні опори 3-5 Ом з температурним коефіцієнтом 0,01 - 0,02 % / °C.

Характерною особливістю будь-якого інтегрального резистора є наявність у нього паразитної ємності відносно підкладки або ізолюючого кишени. У найпростішому дифузійному резисторі такий паразитної ємністю є бар'єрна ємність переходу між робочим р-шаром і епітаксialьним n-шаром кишени.

Строго кажучи, сукупність резистора і паразитної ємності являє собою розподілену RC-лінію. В загальному для перехідного процесу  $f_{\text{граничне}} = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{\pi RC}$ , де  $R$  – опір резистора,  $C$  – усереднена ємність переходу.

### 13.1. Плівкові конденсатори в мікроелектроніці.

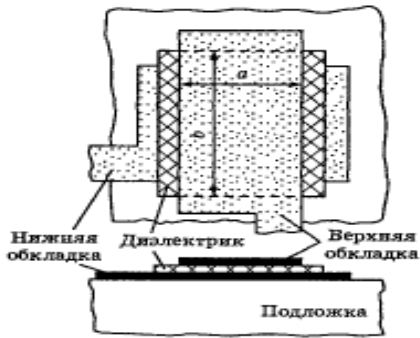


Рис. 7.51. Пленочный конденсатор

Структура та конфігурація типового плівкового конденсатора зображена на мал.

Питома ємність конденсатору визначається за формулою:  $C_{0m} = \epsilon_0 \epsilon / d$ , де товщина

діелектричної плівки  $d$  відповідно залежить від технології: для тонких плівок  $d = 0,1-0,2$  мкм, для товстих  $d = 10-20$  мкм. -> за інших однакових умов питома ємність товстоплівкових конденсаторів менша, ніж тонкоплівкових. Проте різниця в

товщині діелектрика може компенсуватися завдяки різниці діелектричної проникності матеріалів. В тонкоплівкових конденсаторів питома ємність не пропорційна діелектричній проникності матеріала, що використовується, бо враховується ще й його пробивна напруженість. Матеріал з високим значенням  $\epsilon$  може мати малу пробивну напруженість. Тоді при заданій пробивній напрузі товщу діелектричного шару необхідно збільшувати, та виграш в питомій ємності виходить менше очікуваного. При виборі діелектрика для високочастотних конденсаторів необхідно додатково враховувати втрати енергії на діелектрику. Омічні втрати в обкладинках плівкових конденсаторів значно менші, ніж в n\p конденсаторах, бо в якості обкладинок використовуються металеві шари з високою провідністю.

1. Питома ємність плівкових конденсаторів (за належного вибору діелектрика) в декілька раз перевищують питому ємність МОП-конденсаторів та тим більш дифузійних конденсаторів

2. Максимальна ємність плівкових конденсаторів може бути на декілька порядків більша, ніж ємність n\p конденсаторів, головним чином завдяки площі

3. Товстоплівкові конденсатори незначною мірою поступаються тонкоплівковим за більшістю параметрів, за виключенням, можливо, теплового коефіцієнта

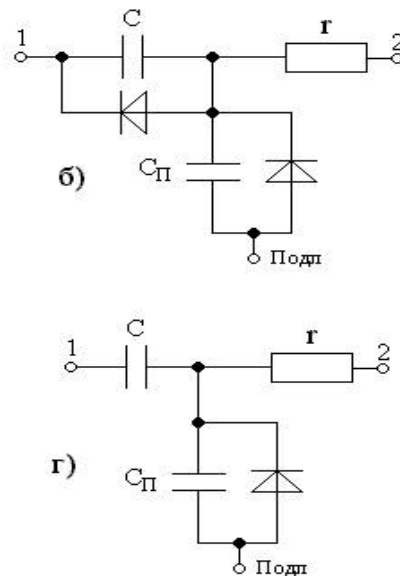
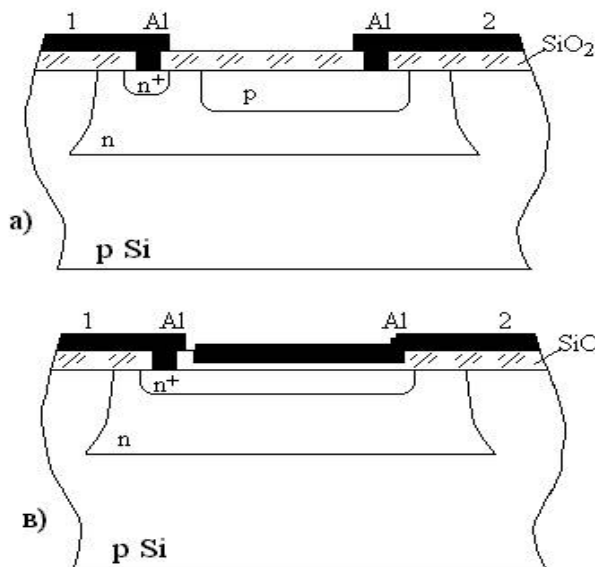
4. Для високочастотних тонкоплівкових конденсаторів оптимальним діелектриком є монооксид кремнію або монооксид германію.

Останнім часом (через наявність мініатюрних дискретних датчиків) спостерігається тенденція відмови від плівкових конденсаторів та заміна їх навісними конденсаторами.

### 13.2. Напівпровідникові конденсатори в мікроелектроніці.

У біполярних напівпровідникових ІМС (інтегральних мікросхемах) роль конденсаторів відіграють назад зміщені р-п переходи. У таких конденсаторів хоча б один з шарів є дифузійним, тому їх називають дифузійними конденсаторами.

Дифузійні конденсатори: Типова структура дифузійного конденсатора, в якому



використовується перехід колектор - база, показана на рис а). Ємність такого конденсатора в загальному випадку :  $C = C_0 \times S$ , (4.3), де  $C_0$  - питома ємність р-п переходу,  $S$  - площа конденсатора.

Оптимальною, конфігурацією є форма близька до квадрату. Наприклад, якщо  $C_0 = 150 \text{ пФ/мм}^2$  і  $C = 100 \text{ пФ}$ , то  $S \gg 0,8 \text{ мм}$ . Як бачимо, розміри конденсатора вийшли порівнянними з розмірами кристала.

Основні параметри дифузійного конденсатора наведені у таблиці 4.2 для обох варіантів конденсаторів - з використанням колекторного і емітерного переходів. Як бачимо, основна перевага при використанні емітерного переходу - великі значення максимальної місткості. За пробивному напрузі цей варіант поступається варіанту з використанням колекторного переходу. Еквівалентна схема конденсатора наведена на малюнку б.

Таблиця 4.2

Тип конденсатора	$C_0$ , пФ/мм <sup>2</sup>	d, %	ТКЕ, %/°C	U <sub>ПР</sub> , В	Q (1 МГц)
Переход БК	150	±20	-0,1	50	5-10
Переход БЭ	1000	±20	-0,1	7	5-10
МОП-структура	300	±25	0,02	20	100

Необхідною умовою для нормальної роботи конденсатора є зворотний зсув р-п переходу. -> напруга на конденсаторі повинно мати строго певну полярність. ємність залежить від напруги -> конденсатор є нелінійним з вольт-фарадні характеристикою, як у варіакапа. Однак частіше потрібні лінійні конденсатори з постійною ємністю, які здатні пропускати без спотворення змінні сигнали і «блокувати» постійні складові сигналів, вони успішно виконують таку функцію за наявності постійного зміщення  $E$ , що перевищує амплітуду змінного сигналу.

є можливість змінювати значення ємності, змінюючи зсув  $E$ . -> конденсатор можна

використовувати не лише в якості «звичайного» конденсатора з постійною ємністю, але і в якості конденсатора з електрично керованою ємністю (конденсатора змінної ємності). Однак діапазон електричного регулювання обмежений: змінюючи зсув  $E$  від 1 до 10 В можна змінити ємність конденсатора всього в 2-2,5 рази. Через високого опору колекторного  $n$ -шару добротність таких конденсаторів низька.

**МОП-конденсатор.** принципово відмінні від дифузійного. Його типова структура показана на малюнку в. Тут над емітерним  $n +$  - шаром за допомогою додаткових технологічних процесів вирощений шар тонкого (0,08-0,12 мкм) оксиду. Надалі, при здійсненні металевої розводки, на цей шар напилюється алюмінієва верхня обкладка конденсатора. Нижньої обкладкою служить емітерний  $n +$  - шар. Основні параметри МОП-конденсаторів наведені в таблиці 4.2. Добротність вище, тому що опір  $r$  значно нижче через  $n +$ -шару. Важливою перевагою МОП-конденсаторів : вони працюють при будь-якій полярності напруги, тобто аналогічні «звичайному» конденсатору. Однак МОП-конденсатор теж нелінійний. Паразитна ємність МОП-конденсаторів враховується за допомогою вже відомої еквівалентної схеми (рис. г), де під ємністю СП слід розуміти місткість між  $n$ -кишенею і  $p$ -підкладкою.

в МОН-транзисторних ІМС, на відміну від біполярних, виготовлення МОП-конденсаторів не пов'язане з додатковими технологічними процесами: тонкий оксид для конденсаторів виходить на тому ж етапі, що й тонкий оксид під затвором, а низькоомним напівпровідниковий шар - на етапі легування витоку і стоку. Ізолюючі кишені в МОП-технології відсутні.

### 13.3. Реалізація індуктивності в мікроелектроніці.

Індуктивності являють собою плоскі спіралі, зазвичай прямокутної конфігурації(див мал). Для зменшення опору в якості матеріалу використовується золото. Ширина металевої полоски складає 30-50 мкм, просвіт між витками 50-100мкм. При таких розмірах питома індуктивність лежить в межах 10-20 нГн\мм<sup>2</sup>

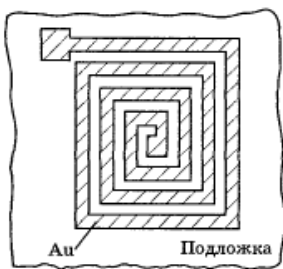


Рис. 7.52. Пленочная катушка индуктивности

Добротність котушки індуктивності на високій частоті визначається виразом:  $Q_v = \omega L / r_v$ , де  $r_v$  - опір високочастотних

втрат. Наприклад, на частоті 100МГц добротність може мати значення  $Q_v = 50$ . Добротність котушки збільшується зі збільшенням частоти, тому плівкові котушки можуть працювати в діапазоні надвисоких частот, при частотах 3-5 ГГц, при цьому число витків складає 3-5. В зв'язку з розробкою мікромініатюрних дріт'яних катушок застосування

плівкових катушок, особливо на частотах 50-100 МГц, обмежується, і перевага, як і у випадку конденсаторів, віддається навісними компонентам.

### 13.4. Особливості створення тонкоплівкових та товстоплівкових пасивних елементів у МЕ

Конфігурації тонко- та товстоплівкових елементів однакова, проте її конкретні геометричні розміри можуть суттєво відрізнятися в залежності від матеріала, що використовується. Плівкові елементи немає необхідності ізолювати один від одного оскільки всі вони виконуються на діелектричній підкладинці. Оскільки підкладка порівняно товста (не менше 500 мкм), а відстань між елементами порівняно велика, паразитні ємності майже відсутні і їх вплив на еквівалентних схемах майже не має сенсу.

Резистори: структура і конфігурація зображені на мал. В загальному випадку конфігурація плівкового резистора зигзагоподібна або полосковою.

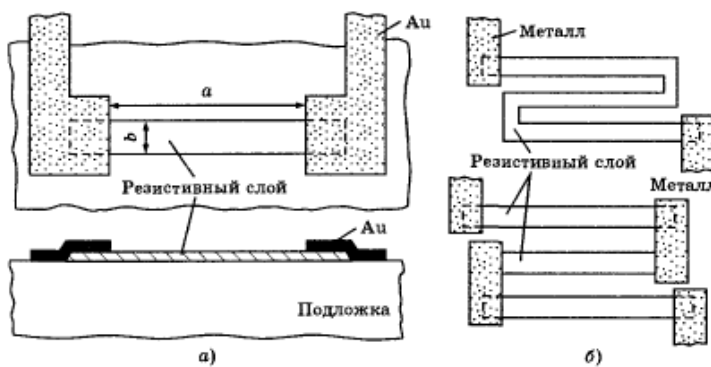


Рис. 7.50. Пленочные резисторы полосковой (а) и зигзагообразной (б) конфигурации

1) Діапазон опорів плівкових резисторів порівняно ширший, ніж н\п. 2) тонкоплівкова технологія забезпечує більш високу прецизійність та стабільність резисторів; 3) підгін забезпечує суттєве зменшення розбросу опорів; 4) відношення опорів характеризується меншим розкидом та меншим ТКС, ніж окремих опорів. Підгін опорів

можна здійснювати різним чином. Найпростіший: часткове механічне зіскрібання резистивного шару до того, як на поверхню ІС захищається тим чи інакшим покриттям. Більш досконалими є методи часткового видалення шару за допомогою електричної іскри, електронного чи лазерного променя. Всі ці способи дозволяють лише збільшувати опір резистора. Найбільш досконалим є метод, що складається в пропусканні крізь резистор досить великого струму. При струмовій підгінці одночасно йдуть 2 процеси: окислення поверхні резистивного шару (збільшення опору) та впорядкування його мілкозернистої структури (зменшення). Підбираючи силу струму та атмосферу, в якій ведеться підгін, можна забезпечити зміну опору в той чи інший бік на  $\pm 30\%$  з похибкою до долей відсотка.

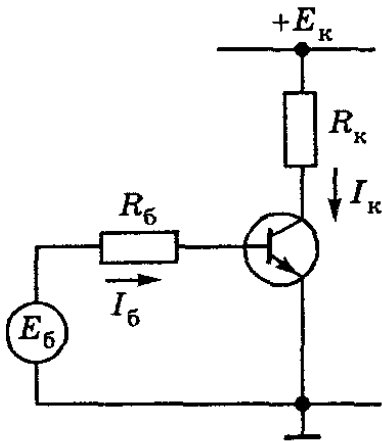
Конденсатори: див питання 13.1

Катушки індуктивності: див питання 13.3

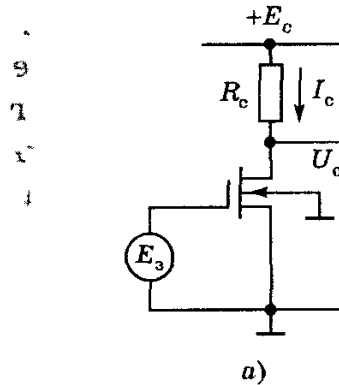


### 14.1. Ключі та бістабільні комірки.

**Транзисторний ключ** – схема, що реалізує один з 2х стійких станів – розімкнений і замкнений. Найпростіший біполярний ключ рис 8.2, МДН – 8.16. Принцип їх роботи очевидний(якщо є час можете написати)

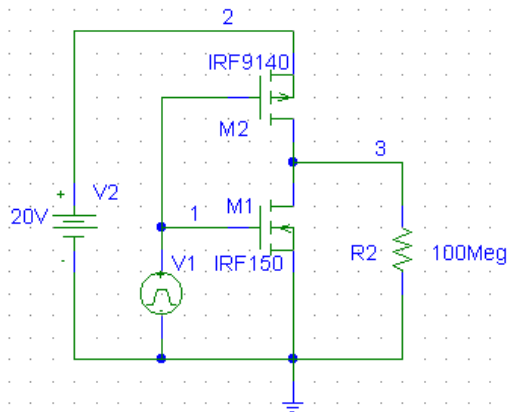


**Рис. 8.2. Простейший транзисторный ключ**



**Рис. 8.16. МДП-транзисторный**

Важливим в CMOS технології є комплементарний ключ на МДН транзисторах. Тут є 2 транзистора з різними типами каналів. Якщо на вхід подано 0, нижній транзистор (T2 n-канал) буде закритим, оскільки канал відсутній. Верхній (T1 p-канал) буде відкритим, т.я. затвор матиме від'ємний потенціал відносно підкладки. Таким чином на T1 майже не буде падати напруга, а на T2 буде падати практично вся напруга – а значить на виході схеми буде високий рівень сигналу.



Якщо ж подати напругу порядку 20В (для даної схеми), то T2 відкриється, а T1 закриється(міркування аналогічні) і на ньому буде спадати практично вся напруга, а значить на виході буде низький рівень сигналу (близький до 0)

Важливою особливістю комплементарного ключа є те, що в обох станах він практично не споживає потужності, оскільки один з транзисторів завжди буде закритим, а струм через закритий МДН транзистор дуже малий.

Якщо напруга живлення достатньо велика, то при певних інтервалах керуючого сигналу може реалізуватись стан коли відкриті обидва транзистори. Він є небажаним, т.я. в такому випадку буде протікати доволі значний струм в схемі, що може призвести до виходу її з ладу. Але для зазвичай для подібних ключів використовується низька напруга живлення і такий стан не реалізується.

## Бістабільні комірки

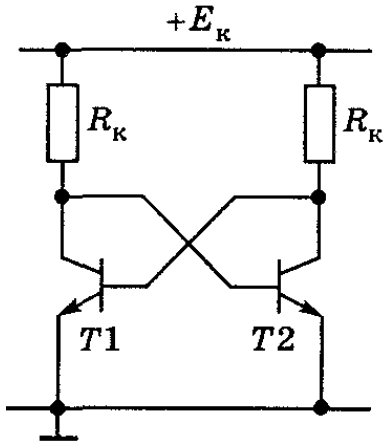


Рис. 8.27. Бістабільна ячейка

БК (рис 8.27) – основа тригерів. Їх особливість полягає у тому, що один з транзисторів у схемі відкритий і насичений, а другий закритий і цей стан є стійким. Тобто хоча схема є симетрична їй притаманна електрична асиметрія. Доведемо це. Нехай схема в симетричному стані, коли обидва транзистори відкриті й працюють на межі активного режиму. Колекторний струм:  $I_k = BI_6$ . Нехай тепер напруга на базі Т1 внаслідок флуктуації зросла на малу величину. Тоді зміна струмів буде наступною:  $\Delta I_{61} = \frac{\Delta U_{61}}{R_{вх}}$ ;  $\Delta I_{k1} = B\Delta I_{61}$ ,  $R_{вх}$  – вхідний опір відкритого транзистора. Частина приросту  $\Delta I_{k1}$  піде в базу Т2.  $\Delta I_{62} = -m\Delta I_{k1}$ ;  $\Delta I_{k2} = B\Delta I_{62}$ ,  $m < 1$ . Аналогічно,  $\Delta I_{k2}$  частково піде в Т1:  $\Delta I'_{61} = m\Delta I_{k2} = m^2 B^2 \Delta I_{61}$ .

Таким чином, маємо ще додатковий приріст струму бази в Т1, який буде надалі зростати лавиноподібно і в кінці кінців закриється транзистор Т2. Якщо ж флуктуація буде від'ємна – закриється Т1.

Примітка:

Запертое состояние обоих транзисторов невозможно, так как при этом коллекторные потенциалы были бы равны  $+E_k$ , т. е. превышали бы напряжение отпирания  $U^*$ . Невозможно и насыщенное состояние обоих транзисторов, так как тогда коллекторные потенциалы были бы меньше  $U^*$ .

Більше див питання 14.4 (Тригери).

## 14.2. Перемикачі струму

Перемикач струму – симетрична схема(рис) в якій заданий струм  $I_0$  протікає через одну чи іншу гілку в залежності від потенціалу  $U_6$  на одному з входів.

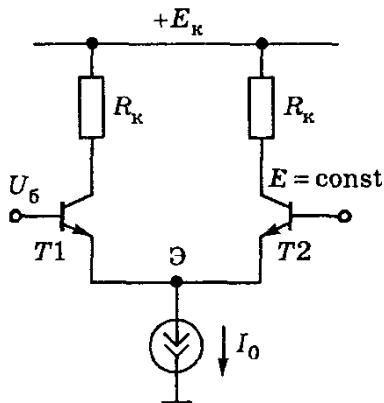


Рис. 8.13. Переключатель тока

Потенціал на іншому підтримується сталим. Таким чином перемикання здійснюється напругою а не струмом. Також транзистори працюють у відкритому режимі, а не в насиченні, що забезпечує більш швидке перемикання(мала затримка на розсисання(с) неосновних носіїв у базах обох транзисторів).

Статичний режим:  $U_6 = E$  - протікає однаковий струм через T1 і T2.

Зменшуємо  $U_6$  на  $dU \geq 0.1$  V. Потенціал  $U_3$  не змінюється, отже  $U_{be1}$  зменшиться теж на  $dU$ , тобто закриється перехід ЕБ і струм через T1 впаде практично до 0, а через T2 буде повний струм. Величину  $E_6^- = E - dU$  назовемо запірним потенціалом.

Якщо збільшити  $U_6$  на  $dU \geq 0.1$  V, то T1 буде відкритим і має зрости потенціал  $U_3$  на ту ж величину. А значить  $U_{be2}$  зменшиться й T2 закриється – тоді весь струм піде через T1.  $E_6^+ = E + dU$  – відкриваючий потенціал.

Зауваження: для того щоб не було насичення транзисторів необхідно дотримуватись того щоб на колекторному переході був додатній потенціал (можна малий від'ємний, але щоб не було інжекції).

Перехідні процеси в перемикачах: у вихідному стані потенціал запірний  $E_6^-$ . Подаємо  $E_6^+$  - перший етап перехідного процесу – зарядка входної ємності з часом  $t_{ef} = 0.7 r_6 C_{вх}$ . Після відкривання T1 через його емітерний перехід протікає струм  $I_0$ , а потенціал бази незмінний -  $E_6^+$  – тобто T включений за схемою СБ. Постійна часу для струму колектора в схемі СБ:

$$t_{екв} = \frac{t_3}{B_N + 1} + C_k R_k, \text{ де } B_N - \text{статичний коеф. підсилення струму бази.}$$

$$\text{Тривалості фронту і зрізу будуть однакові: } t_\phi = t_3 = 2.2 t_{екв}$$

Також варто робити  $R_k$  близьким до першого доданку або меншим, для зменшення перехідного процесу.

### 14.3.1. Диференціальний каскад = диференціальний підсилювач.

Диференціальний підсилювач — електронний підсилювач з двома входами, вихідний сигнал якого пропорційний різниці вхідних напруг. Застосовується у випадках, коли необхідно підсилити різницю напруг на тлі значної синфазної складової. Якщо на базу транзистора  $VT1$  подати вхідний сигнал  $v_{BX1}$ , а на базу  $VT2$  - другий вхідний сигнал  $v_{BX2}$ , то вихідний сигнал може бути пропорційним до різниці цих вхідних сигналів

$$v_{BHX} = k(v_{BX2} - v_{BX1}) \quad (6.8)$$

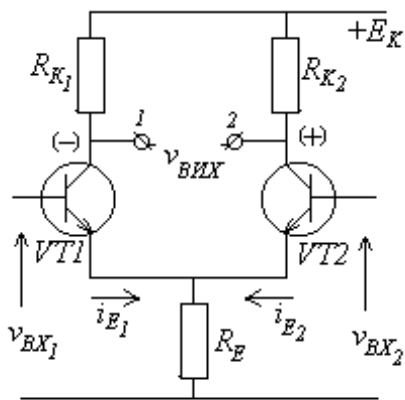


Рис.6.8.

В ідеальному ДУ дрейф вихідної напруги відсутній, хоча в кожному з плечей він може бути доволі великим. Спрощена схема диференціального підсилювача зображена на рис.6.8. Сигнальна складова напруги на першому виході  $v_{BHX1} = \Delta U_{K1} = -i_{K1} R_{K1}$ , а на другому виході  $v_{BHX2} = \Delta U_{K2} = -i_{K2} R_{K2}$ . Нехай  $R_{K1} = R_{K2} = R_K$ . Різницева напруга між виходами

$$v_{BHX} = v_{BHX1} - v_{BHX2} = -R_K(i_{K1} - i_{K2}) \quad (6.9)$$

Якщо на бази подати однакові напруги то потенціали емітерів зміняться на ту саму величину як і потенціали баз. Якщо джерело струму ідеальне то приріст потенціалу емітера не викликає зміну струмів у плечах, колекторні потенціали не зміняться і вихідна напруга залишиться рівною нулю. В ідеальному ДУ синфазні сигнали не впливають на вихідну напругу.

Якщо подати на бази однакові за модулем але різні за знаком напруги(диференціальний сигнал) то їх різниця буде вхідним сигналом, і в силу симетрії це сигнал поділиться порівну між двома емітерними переходами. Тоді приріст струму і колекторних потенціалів в плечах ДУ будуть однаковими по модулю, але різного знаку. Отже бачимо, що ідеальний ДУ реагує тільки на диференціальний сигнал. При аналізі диференціальних сигналів можна вважати потенціал емітера заданим, а емітер заземленим для змінних складових.

Величини колекторних струмів приблизно дорівнюють величинам емітерних струмів відповідних транзисторів:  $i_{K1,2} \approx i_{E1,2}$ . Якщо емітерний опір  $R_E$  достатньо великий, струм в нього практично не відгалужується і можна вважати, що  $i_{E1} = -i_{E2} = i_E$ . Але величина емітерних струмів визначається різницею напруг  $v_{BX1} - v_{BX2}$  на входах транзисторів:

$$i_E = \frac{v_{BX1} - v_{BX2}}{2h_{11E}} \quad (6.10)$$

де  $h_{11E}$  - вхідний опір транзистора для емітерного струму. Підставляючи (6.10) в (6.9), дістанемо

$$v_{BHX} = -\frac{R_K}{h_{11E}}(v_{BX1} - v_{BX2}) = -k_P(v_{BX1} - v_{BX2}), \quad (6.11)$$

де  $k_P$  - різницевий коефіцієнт підсилення. Відповідно для виходів 1 та 2 коефіцієнти підсилення дорівнюватимуть

$$k_{P1} = \frac{v_{BHX1}}{v_{BX1} - v_{BX2}} = -\frac{R_K}{2h_{11E}}; \quad k_{P2} = \frac{v_{BHX2}}{v_{BX1} - v_{BX2}} = \frac{R_K}{2h_{11E}}.$$

Зроблене вище припущення що до великого значення  $R_E$  має, очевидно, такий сенс:  $R_E \gg h_{11E}$  (6.12)

Добре виконання цієї нерівності є запорукою гарної роботи ДП. Проте просте збільшення опору резистора  $R_E$  виявляється не ефективним. Розв'язати цю проблему можна застосувавши як резистор  $R_E$  елемент, що має великий диференціальний опір та невеликий омичний опір.

Перехідні процеси в диференціальному каскаді такі самі як і в простіших каскадах, але постійна часу і тривалість фронту виявляються гіршими ніж у простіших каскадів.

Таким чином, ми з'ясували, що у ідеальному випадку (коли умова (6.12) виконується), сигнали на виходах 1 і 2 визначаються лише різницею вхідних напруг  $v_{BX1}$  та  $v_{BX2}$ . Однак, у реальному приладі на значення вихідних сигналів  $v_{BHX1}$  та  $v_{BHX2}$  все ж таки може позначатися також і абсолютна величина вхідних сигналів.

Вхідні сигнали  $v_{BX1}$  і  $v_{BX2}$  можна розкласти на різницеву  $v_{BXP}$  та середню  $v_{BXC}$  (синфазну) компоненти:

$$v_{BX1} = \frac{v_{BX1} - v_{BX2}}{2} + \frac{v_{BX1} + v_{BX2}}{2} = \frac{v_{BXP}}{2} + v_{BXC}$$

$$v_{BX2} = \frac{v_{BX2} - v_{BX1}}{2} + \frac{v_{BX1} + v_{BX2}}{2} = -\frac{v_{BXP}}{2} + v_{BXC}$$

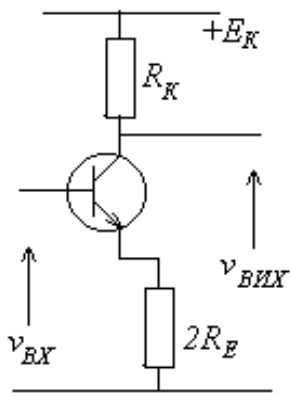


Рис. 6.9.

На величину вихідних сигналів  $v_{BИХ1}$  та  $v_{BИХ2}$  впливатиме не тільки величина різницевого вхідного сигналу  $v_{BXP}$ , але й синфазна компонента  $v_{BXC}$ . Дійсно, розглянемо випадок, коли до обох входів ДП прикладена однакова напруга  $v_{BX1} = v_{BX2} = v_{BX}$ . Оскільки при цьому кожна з половин ДП працює симетрично, то їх роботу можна розглядати порізно, так, ніби ми розрізали схему зображену на рис. 6.8 надвоє і одержали просто каскад підсилювача з емітерним опором  $2R_E$  (рис. 6.9).

Коефіцієнти підсилення такої схеми за симетричним (синфазним) сигналом по виходах 1 і 2

дорівнюватиме

$$k_{C1} = \frac{v_{BИХ1}}{v_{BX1}} = \frac{R_K}{2R_E} \quad k_{C2} = \frac{v_{BИХ2}}{v_{BX2}} = \frac{R_K}{2R_E}$$

і будуть набагато меншими відповідних різницевих коефіцієнтів підсилення  $k_{P1}$  та  $k_{P2}$ . Їх відношення називається коефіцієнтом ослаблення за синфазним сигналом  $k_{OCC}$ :

$$k_{OCC} = \frac{k_{P1}}{k_{C1}} = \frac{k_{P2}}{k_{C2}} = \frac{R_E}{h_{11B}} \quad (6.13)$$

і є мірою якості диференціального підсилювача. Адже коефіцієнт  $k_{OCC}$  вказує який різницевий сигнал ( $v_{BX1} - v_{BX2}$ ) може бути виявлений на фоні великого синфазного сигналу. Так, наприклад, при  $k_{OCC} = 10^3$  можливе виявлення різницевих сигналів порядку мілівольта на фоні синфазних сигналів порядку в один вольт. Коефіцієнт ослаблення за синфазним сигналом часто виражають у децибелах

$$k_{OCC} = 20 \lg \frac{k_P}{k_C} \text{ (дБ)}$$

У хороших диференціальних підсилювачах він досягає 80 - 100 дБ.

Таким чином, запорукою успішної роботи ДП є добре виконання нерівності  $R_E \gg h_{11B}$ . Проте просте збільшення опору резистора  $R_E$  виявляється не ефективним. Припустимо, бажано одержати  $k_{OCC} = 10^4$  (тобто 80 дБ). Тоді при  $h_{11B} = 30$  Ом величина  $R_E$  має дорівнювати  $3 \cdot 10^5$  Ом. Якщо, навіть, у кожного з транзисторів колекторний струм буде  $I_{K0} = 1$  мА, то на  $R_E$  спадатиме напруга у 600 в. Це нереально.

### 14.3.2. Коефіцієнти підсилення синфазної складової та диференціальної складових диференціального підсилювача. Коефіцієнт придушення синфазної складової

**Диференціальний підсилювач**(ДП) – електронний підсилювач з двома входами, вихідний сигнал якого рівний різниці входних напруг, помножених на константу – підсилювач диференціального сигналу. Проте із-за неідеальності елементів частина входного синфазного сигналу також підсилюється. Ступінь подавлення входної синфазної напруги називається *коефіцієнтом придушення синфазної складової*.

**Трошки про сигнали:**

**Синфазний сигнал** – рівні за абсолютною величиною та фазою входні напруги.

**Диференціальний сигнал** – входні напруги рівні за абсолютною величиною, але протилежної фази.

Будь-яку комбінацію входних напруг  $U_{\text{вх1}}$  та  $U_{\text{вх2}}$  можна представити у вигляді суми синфазної та диференціальної складової

$$U_{\text{вх1}} = U_{\text{вх с}} + \frac{1}{2} U_{\text{вх д}}$$

$$U_{\text{вх2}} = U_{\text{вх с}} - \frac{1}{2} U_{\text{вх д}}$$

Звідси маємо вирази для синфазної та диференціальної складової входної напруги

$$U_{\text{вх с}} = 1/2(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}})$$

$$U_{\text{вх д}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}$$

**Знову до справи:**

В реальному ДП, у якому обидва плеча неідентичні, а джерело струму має скінченний опір, має місце вплив синфазної складової входного сигналу на диференціальну складову вихідного сигналу та вплив диференціальної складової входного сигналу на синфазну складову вихідного.

В загальному випадку співвідношення між синфазними і диференціальними складовими має вигляд

$$U_{\text{вих с}} = K_{\text{сс}} U_{\text{вх с}} + K_{\text{сд}} U_{\text{вх д}} \quad (1a)$$

$$U_{\text{вих д}} = K_{\text{дс}} U_{\text{вх с}} + K_{\text{дд}} U_{\text{вх д}} \quad (1б)$$

Тут  $K$  – коефіцієнти передачі відповідних складових зі входу на вихід

$K_{\text{дд}}$  – коефіцієнт підсилення диференціальної складової(або просто коефіцієнт підсилення  $K$ )

$$K_{\text{дд}} = \frac{\alpha R_k}{r_e + (1 - \alpha)(R_r + r_6)}$$

$\alpha$  – коефіцієнт передачі струму емітера(порядку 0.9-0.999)

$r$  – внутрішній опір,  $R$  – повний опір

$K_{\text{сс}}$ - коефіцієнт підсилення синфазної складової визначається як

$$K_{\text{сс}} = \frac{U_{\text{вих с}}}{U_{\text{вх с}}} \Big|_{U_{\text{вх д}}=0}$$

При цьому, якщо опір джерела рівний  $R_l$  то зміна емітерного струму буде рівною  $\Delta I_0 = U_{\text{вх с}}/R_l$ , а зміна колекторних потенціалів – на величину(тут мінус)  $-\frac{1}{2} \alpha R_k \Delta I_0$ . Тоді

$$K_{\text{сс}} = -\frac{(\alpha R_k)}{2R_l}$$

Коефіцієнт  $K_{\text{дс}}$  характеризує вплив синфазної складової вхідного сигналу на диференціальну складову вихідного. Цей вплив дуже суттєвий, оскільки доданок  $K_{\text{дс}} U_{\text{вх с}}$  невідрізнимий від доданку  $K_{\text{дд}} U_{\text{вх д}}$ , тобто рівносильний хибному сигналу. Оскільки на практиці складова  $U_{\text{вх с}}$  може в тисячі разів перевищувати складову  $U_{\text{вх д}}$ , то значення  $K_{\text{дс}}$  повинно бути менше  $K_{\text{дд}}$  на декілька порядків. Співвідношення модулів цих двох величин прийнято характеризувати **коефіцієнтом придушення синфазної складової**, вираженим у децибелах:

$$K_{\Pi} = 20 \lg \left| \frac{K_{\text{дд}}}{K_{\text{дс}}} \right|$$

Розповсюдженим типом синфазної складової являються різноманітні(внутрішні і зовнішні) перешкоди, що діють на обидва входи. Тому підвищення  $K_{\Pi}$  – один з головних шляхів підвищення завадостійкості ДП. Для його оцінки припустимо, як і раніше, що опір джерела  $=R_l$ , а неідентичність плечей ДП визначається співвідношеннями

$$\alpha_1 = \alpha + \Delta\alpha; \quad \alpha_2 = \alpha - \Delta\alpha$$

$$R_{\text{к1}} = R_k + \Delta R_k; \quad R_{\text{к2}} = R_k - \Delta R_k;$$

Тоді зміну колекторних потенціалів можна записати наступним чином

$$\Delta U_{\text{к1}} = -\alpha_1 \frac{U_{\text{вх с}}}{2R_i} R_{\text{к1}};$$

$$\Delta U_{\text{к2}} = -\alpha_2 \frac{U_{\text{вх с}}}{2R_i} R_{\text{к2}};$$

$$U_{\text{вых д}} = \Delta U_{\text{к1}} - \Delta U_{\text{к2}}$$



Прирівнюючи цю різницю першому доданку в правій частині (1б) маємо

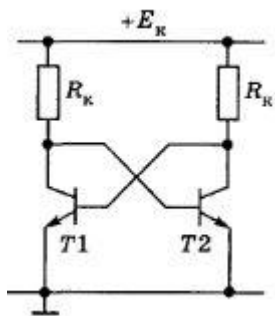
$$K_{dc} = -\alpha \frac{R_k}{R_i} \left( \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta R_k}{R_k} \right)$$

Отже в нелогарифмічній формі  $K_{\pi} = \frac{1}{\delta} \frac{R_l}{r_e}$ , де  $\delta = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta R_k}{R_k}$  – коефіцієнт асиметрії ДП.

Коефіцієнт придушення напряму залежить від опору джерела струму, отже цей опір має бути якнайбільшим.

## 14.4. Тригер

Тригер (основна частина якого - бістабільна комірка) — електронна логічна схема, яка має два стійкі стани, в яких може перебувати доки не зміняться відповідним чином сигнали керування. Напруги і струми на виході тригера можуть змінюватися стрибкоподібно. Умова стійкості бістабільної комірки характеризується тим, що один із ключів у закритому стані, а інший у відкритому та насиченні. Можна сказати, що БК притаманна електрична асиметрія. Лавинний процес зростання струмів в одній частині БК і зменшення в іншій половині наз. регенерацією. Регенерація закінчується запиранням одного з ключів та насиченням другого. При прикладанні позитивної флуктуації  $\Delta U_{61}$  запирається транзистор Т2, при від'ємній – Т1. Оскільки знак флуктуації – випадкова величина, то і результати лавинного процесу(запирання транзисторів) рівно імовірні. Ціль керування БК складається з того, щоб за допомогою зовнішніх сигналів задавати той чи інший з 2 стійких станів.



*Встановлення стану БК.* Для реалізації такого стану, паралельно до кожного з

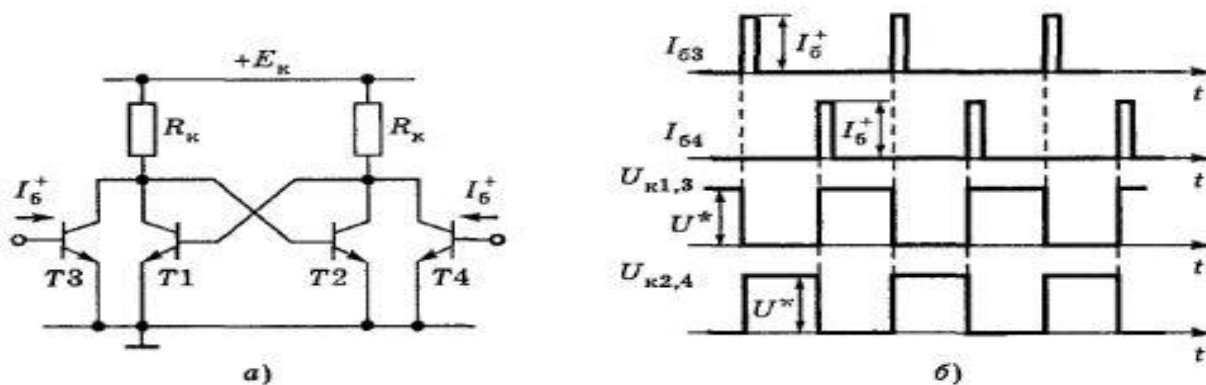


Рис. 8.28. Схема (а) и временные диаграммы (б) симметричного триггера с раздельными входами установки

транзисторів, що входять до складу БК, підключається ще один транзисторний ключ(Т3 або Т4). Дані ключі керуються зовн. сигналом – струмом бази, що приймає значення:  $I_6^+$  або 0.

Нехай в початковий момент Т1 закритий, Т2 відкритий і в насиченні, і обидва Т3 і Т4 закриті також. Якщо відкрити Т4 струмом  $I_6^+$ , то стан БК не зміниться, оскільки напруга  $U_{к2} \rightarrow 0$ . Якщо відкрити Т3, то потенціал  $U_{к1} \rightarrow 0$ , разом з ним падає до нуля і потенціал бази  $U_{62}$ , значить Т2 закривається. При цьому за рахунок регенерації Т1 відкривається до насичення. Після того як новий стійкий стан досягнуто, Т3 втрачає керуючі властивості, тобто відсутній вплив потенціалів  $U_{к1}$  і  $U_{62}$ . Щоб повернутись у початковий стан потрібно відкрити Т4. Зазначимо, що

одночасний доступ відкриваючих імпульсів на обидва входи неможливий (на базах Т1 і Т2 буде нульовий потенціал, тобто закриті).

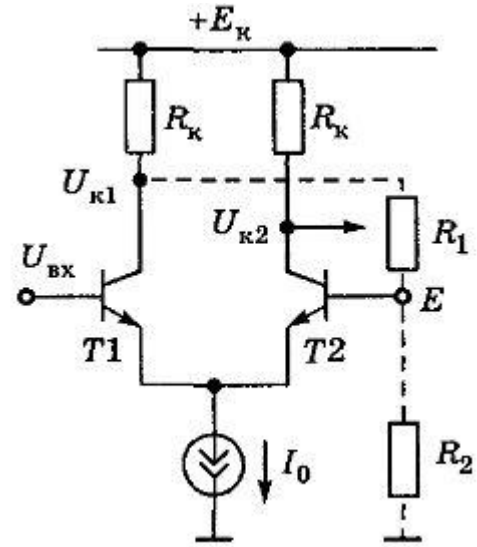
*Перехідні процеси.* Зрозуміло, що БК не переходить і одного стійкого стану в інший миттєво, тому що кожному ключу властива інерційність при зміні струмів та напруг. Нехай в початковий момент Т1 закритий, Т2 відкрий, і нехай в момент  $t=0$  стрибком відкривається до насичення, керуючий ключ Т3. Тоді на 1етапі відбувається закривання Т2, тобто розсмоктування заряду у всіх його шарах, а потім швидкий спад до нуля колекторного струму. Потім на 2етапі, заряджається вхідна ємність Т1. Тоді напруга  $U_{б1}$  досягає  $U^*$ , Т1 відкривається. На 3етапі відбувається наростання струму  $I_{к1}$ , цей етап закінчується насиченням Т1. На 4етапі відбувається накопичення надлишкового заряду в шарах насиченого транзистора. Тому загальний час перемикання тригера:

$t_{\pi} = t_p + t_{зф} + t_{\phi} + t_{\pi}$ , де  $t_p$ - час розсмоктування,  $t_{зф}$ - затримка фронту,  $t_{\phi}$ - тривалість фронту,  $t_{\pi}$ - час накопичення. У випадку досить коротких вхідних сигналів  $t_{\pi}$  визначається тривалістю вхідного сигналу. Якщо  $t^+ = t_{зф} + t_{\phi}$ , накопичення надлишкового заряду не відбувається і  $t_{\pi} = 0$ . Таким чином, максимальна робоча частота тригера визначається часом перемиканням при умові  $t_{\pi} = 0$ :

$$F_{\text{макс}} = (t_p + t_{зф} + t_{\phi})^{-1}$$

### 14.5. Тригер Шмідта

В основі лежить перемикання струму.  $U_{\text{б2}}$  позначений як  $E$  (не постійна). Для спрощення ідеалізуємо подільник  $R_1, R_2$ , враховуючи, що вони не використовують струм і тільки передають частину напруги  $U_{\text{к1}}$  на базу Т2:  $E = \gamma * U_{\text{к1}}$ , де  $\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ .



Нехай в початковий момент Т1 закритий, Т2 відкритий, але працює в активному режимі. Тому потенціал:  $U_{\text{к1}} = E_{\text{к}}$ ,  $E = \gamma * E_{\text{к}}$ ,  $U_{\text{к2}} = E_{\text{к}} - I_0 R_{\text{к}}$ . Активний режим – виконання умови:  $U_{\text{к2}} \geq E$ , звідки легко отримати границю на значення  $I_0 R_{\text{к}}$ . Початковий стан зберігається до того, поки Т1 закритий, тобто при вхідних напругах менших за  $E$ . Нехай  $U_{\text{вх}}^*$  напруга відкриття Т1:

$$U_{\text{вх}}^+ = E - \delta = \gamma * E_{\text{к}} - \delta$$

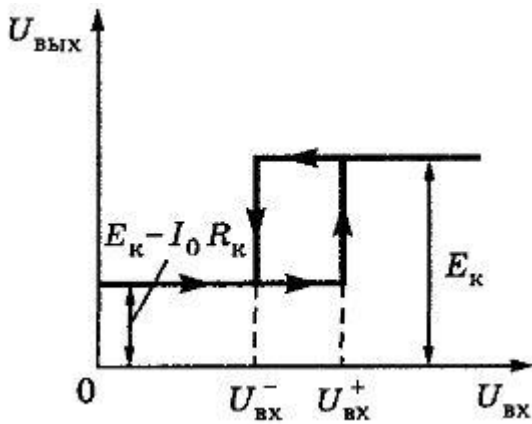
Нехай вхідний сигнал  $U_{\text{вх}}$  трохи більший напруги відкриття, то з'являється приріст струму  $\Delta I_{\text{к1}}$ . Тоді отримаємо:  $\Delta U_{\text{к1}} = -\Delta I_{\text{к1}} R_{\text{к}}$ ,  $\Delta E = \gamma * U_{\text{к1}}$ ,  $\Delta U_3 = \Delta E$  (напруга на емітерному переході не змінюється і дор.  $U^*$ ). Під дією  $\Delta U_3$  виникає приріст колекторного струму:

$\Delta I'_{\text{к1}} = -S * \Delta U_3 = \gamma * S * \Delta I_{\text{к1}} * R_{\text{к}}$ , де  $S$  – крутизна транзистора. Якщо  $\gamma * S * R_{\text{к}} \geq 1$ , то розвивається лавиноподібний процес,  $I_0$  переходить в Т1, Т2 закривається.

Напруга  $U_{\text{вх}}^+$ , при якій відбувається скачок перемикання струму  $I_0$  із Т2 в Т1, називається напругою спрацювання тригера. Після спрацювання потенціали мають вигляд:

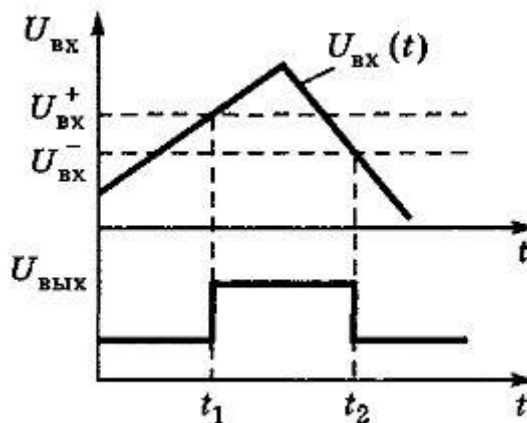
$U_{\text{к1}} = U_{\text{к0}}$ ;  $E = \gamma * U_{\text{к0}}$ ;  $U_{\text{к2}} = E_{\text{к}}$ , де  $U_{\text{к0}}$  – колекторний потенціал, що відкриває Т1. В залежності від п-рів  $I_0$  та  $R_{\text{к1}}$  Т1 може знаходитись як в режимі насичення так і в активному режимі ( $U_{\text{к0}} = E_{\text{к}} - I_0 R_{\text{к1}}$ ). Для того щоб вернути тригер в початковий стан потрібно зменшити вхідний сигнал до значення близького з  $E$ , при якому починає відкриватись Т2 (починається регенеративний процес). Напруга  $U_{\text{вх}}^-$ , при якій відбувається скачок струму з Т1 в Т2, називається напругою відпускання тригера:

$$U_{\text{вх}}^- = E + \delta = \gamma * U_{\text{к0}} + \delta$$



Для тригера Шмідта напруга відпускання менша напруги спрацювання. Вихідний сигнал знімають із колектора Т2, бо він «вільний», а Т2 працює в насиченні, тривалість перехідних процесі досить коротка, набагато менша ніж у БЯ. На рис. показана передаточна характеристика тригера Шмідта, наявність 2 порогових напруг призводить до появи петлі гістерезису з шириною  $U_{ВХ}^+ - U_{ВХ}^-$ .

Також тригер Шмідта можна використовувати як дискримінатор («различитель»). При плавному зростанні  $U_{ВХ}$ , починаючи з нуля, схема знаходиться в початковому стані (Т1 закритий). Коли  $U_{ВХ}$  досягає  $U_{ВХ}^+$ , відбувається спрацювання тригера, закривається і на виході позитивний скачок напруги. Якщо вхідний сигнал досягає порогового значення спрацювання, то такий скачок відсутній. Тригер Шмідта дозволяє «сортувати» вхідні сигнали по амплітуді: більше  $U_{ВХ}^+$  чи менше  $U_{ВХ}^-$ .



Т2  
не

Тригери широко використовуються для формування імпульсів, у генераторах одиничних сигналів, для побудови подільників частоти, лічильників, перерахункових пристроїв, регістрів, суматорів, у пристроях керування тощо.

## 14.6. Особливості ІЛЕ на біполярних та МДН транзисторах та їх використання в мікросхемах.

Основною перевагою біполярних схем є висока швидкодія (ТТЛШ і ЕСЛ), а МОН-схем – висока ступінь інтеграції і низька споживча потужність (КМОН). Тому зусилля розробників біполярних логічних ІС були направлені на зниження споживчої потужності при заданій швидкодії, а розробників МОН-ІС – на підвищення бистротії зі збереженням низького значення споживчої потужності.

Розв'язок даної задачі було знайдене шляхом синтезу і створення БіКМОН-логічного елемента. Цей крок був забезпечений розробкою технології, що дозволяє сумістити на одному кристалі біполярні і МОН-транзисторні конструкції з необхідними електричними характеристиками.

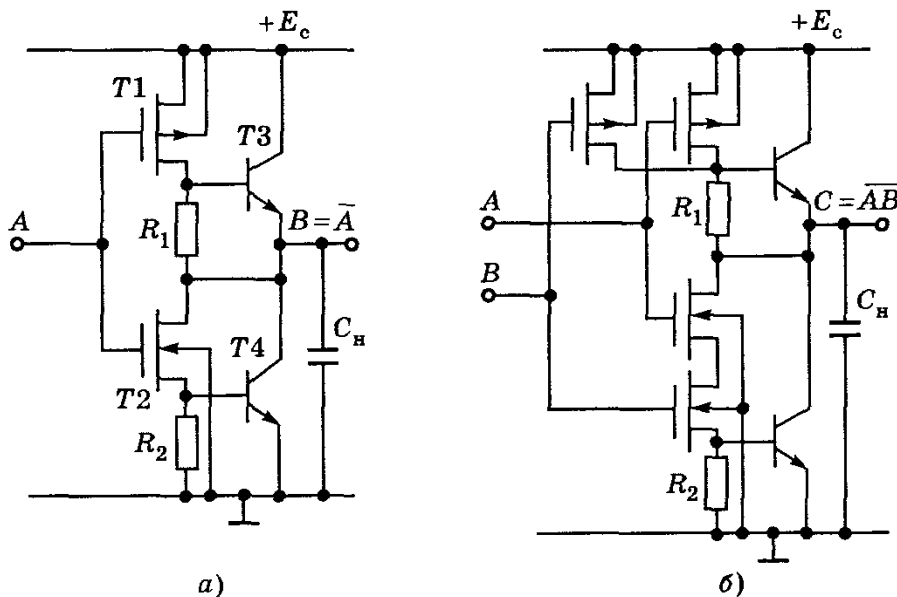


Рис. 10.14. БіКМОП-логические элементы:  
а — инвертор, б — схема И-НЕ

На рис.10.14 показані варіанти БіКМОН-логіки на прикладі простого інвертора, елемента НІ (рис.10.14,а).

В статичному стані цей елемент працює як звичайний КМОН-інвертор (Т1, Т2), у якого послідовно з каналом кожного з транзисторів включені резистори R1, R2, опори яких приблизні опорам

каналів відповідних транзисторів в відкритому стані. Статичні струми в КМОН-інверторі відсутні, напруги на резисторах R1 і R2 рівні нулю і біполярні транзистори Т3 і Т4, емітерні переходи яких під'єднані до цих резисторів, закриті, тобто біполярні транзистори в статичному стані не впливають на характеристики БіКМОН-вентилів.

Нехай в вихідному положенні на вході інвертора (рис.10.14,а) низький логічний рівень; це відповідає відкритому стану р-канального транзистора Т1 і високому рівню на виході інвертора, тобто конденсатор навантаження Cн заряджений до рівня E<sub>c</sub>. Після поступання на вхід високого логічного рівня транзистор Т1 закривається, а Т2 на паралельно з'єднанні резистор R2 і емітерний перехід біполярного транзистора Т4. Протікання частини розрядного струму через емітерний перехід призводить до відкриття Т4 і значному прискоренню перезаряду ємності навантаження. Процес перемикавання при переході вхідного сигналу із високого логічного рівня в низький відбувається аналогічно (відкриття Т3 викликане зарядним струмом, протікаючим по колу «джерело – Т1 – емітерний перехід Т3»).

Із приведенного опису сліде, що використання біполярних транзисторів дозволяє нейтралізувати вплив ємності навантаження, що є одним із основних факторів, що обмежує швидкодію КМОН-ІС.

### 15.1 Запам'ятовуючі пристрої, їх будова і топологія.

В цифровій техніці системи пам'яті займають одне з найважливіших місць. Системи пам'яті поділяються на зовнішні та внутрішні. Зовнішні – на магнітних плівках та оптичних дисках. Внутрішні з кінця 70х на ІС(інтегральних схемах). Зовнішні характеризуються довгим зберіганням інформації при відсутності живлення, а також майже необмеженою ємністю в бітах.

За функціями, які виконуються, ЗП можна класифікувати на:

оперативні запам'ятовуючі пристрої (ОЗП);

постійні запам'ятовуючі пристрої (ПЗП).

Оперативні ЗП можуть бути виконані як статичними, так і динамічними. В статичних ОЗП записана інформація постійно зберігається у відведеному для неї місці і не порушується при її зчитуванні. Порушення інформації можливе лише при її вимушеному затиранні або при вимкненні напруги джерела живлення.

В динамічних ОЗП інформація . При цьому зчитування інформації супроводжується її порушенням. Для збереження інформації її необхідно записати знов

За типом звернення ЗП діляться на пристрої, що допускають як читання, так і запис інформації, і постійні запам'ятовувальні пристрої (ПЗП), призначені лише для читання записаних у них даних (ROM -- read only memory). ЗП першого типу використовуються в процесі роботи процесора для зберігання виконуваних програм, вихідних даних, проміжних і остаточних результатів. У ПЗП, як правило, зберігаються системні програми, необхідні для запуску комп'ютера в роботу, а також константи. В деяких ЕОМ, призначених, наприклад, для роботи в системах управління з одним і тим же незмінним алгоритмами, все програмне забезпечення може зберігатися в ПЗП.

У ЗП з довільним доступом (RAM -- random access memory) Час доступу не залежить від місця розташування ділянки пам'яті (наприклад, ОЗП).

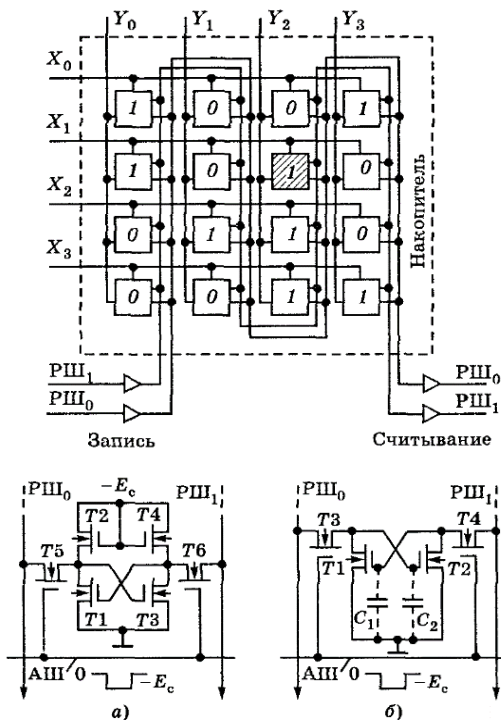
У ЗП з прямим (циклічним) доступом завдяки безперервному обертанню носія інформації (наприклад, магнітний диск - МД) можливість звернення до деякого ділянки носія циклічно повторюється. Час доступу тут залежить від взаємного розташування цієї ділянки і головок читання/запису і багато в чому визначається швидкістю обертання носія.

У ЗП з послідовним доступом проводиться послідовний перегляд ділянок носія інформації, поки що потрібний ділянка не займе деякий потрібне положення навпаки головок читання/запису (наприклад, магнітні стрічки - МС).

## 15.2. Будова статичних та динамічних запам'ятовуючих комірок.

ОЗП – склад. в основному з накопичувача та схем керування(периферії). Накопичувач – основна частина, тут відбув. збереження інфо.; периферія – для вводу/виводу даних(входять різні дешифратори, підсил, регістри, ключі і т.д.).

Накопичувач складається з запам'ятовуючих комірок (бістабільні – можуть бути «0» і «1»). Типовою організацією комірок є матрична. Комірка знаходиться у вузлі решітки, утвореної адресними шиною. Кожна з'єднана з горизонт та вертик. шиною. Це дозволяє звертатись до конкретної комірки. Запам'ятовуючі комірки надзвичайно різноманітні. Рис а. – статична на однотипних МОН Т. Рис б. – динамічна на однотипних МОН Т.



Комірка (а) має структура RS тригера с керуючими ключами T<sub>5</sub>,T<sub>6</sub>. Ці ключі в норм стані закриті і комірка відключена від розрядних шин. При надходженні -E<sub>c</sub> на адресу шин, вони відкриваються і тоді можливо записати та зчитати інфу.

Комірка(б) зберігання бітів відбувається ємностями C<sub>1</sub> та C<sub>2</sub>.(звичайно, паразитними). Методика така ж як і у попередньої. Якщо струм

закритого транзистора буде достатньо малий, то ємність буде розряджатися повільно (достатньо для кількох зчитувань). Тому потрібно проводити періодичний перезапис коду. (регенерация). Взагалі ЗК(комірки) на МОН Т досить економічні та компактніші ніж на біполярних, але поступаються лише швидкодією.

ПЗП – тип пам'яті характерний тим що запис інформації проводиться або раз і назавжди, або являє собою спеціальну дуже рідку операцію. Тому використовують ПЗП в основному для зчитування інформації з них.

Перепалюють перемички діодів в матриці, пропускаючи великі струми(для даного діода). На цьому місці буде «0». Використання МОН Т дозволяє: здійснювати останню фотолітографію замовнику, який наносить металізацію на

затвори, де буде «1»; програмовані ПЗП(ППЗП) – можна змінювати записану інфу. Загальна ідея – можливість змінювати порогову напругу МОН Т. Це можливо : введенням/виведенням зарядів короткими високовольтними імпульсами різної полярності на затворі; (для МОН Т з одношаровим діелектриком) прикладаючи високу напругу до затвора відбувається пробій в діел. в результаті в ньому залишаються електрони. Відповідно змінюється порогова напруга. Перезаписати можна, спочатку

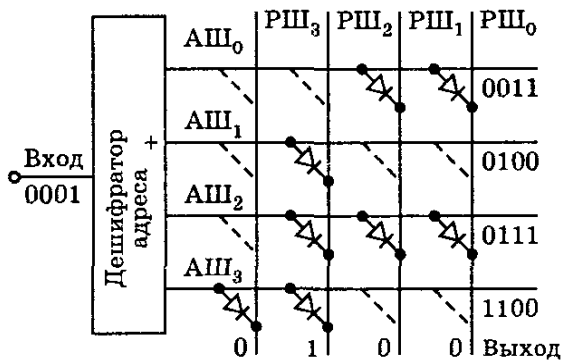


Рис. 10.24. Диодное постоянное ЗУ

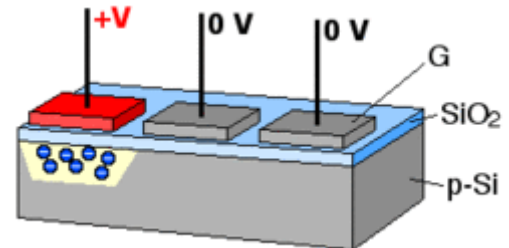
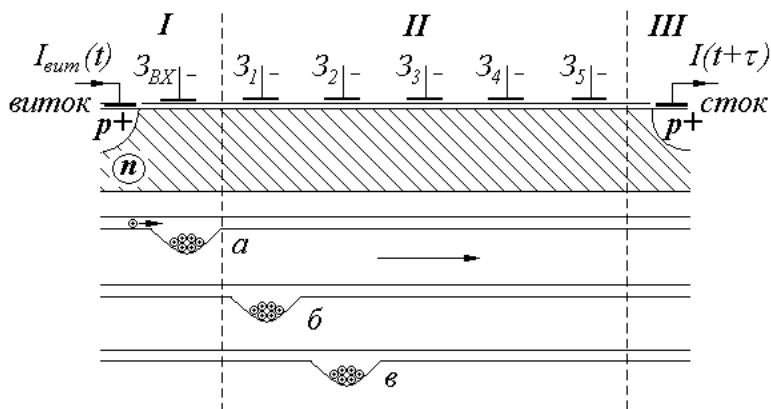
видаливши електрони ультрафіолетом.



## 16.1. ПЗЗ структури. Основні принципи будови приладів ПЗЗ.

Прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) – це пристрій для руху електричного заряду, як правило всередині системи до пристрою, де можна проводити якісь маніпуляції з зарядом, наприклад, оцифровувати його. Це досягається шляхом переносу сигналів поетапно всередині пристрою. Часто в пристрій інтегрований датчик зображення, який продукує сигнал, що потім може бути зчитаний. В результаті цього ПЗЗ стали основою для створення ПЗЗ матриць. Прилади використовуються для детектування світла (фотометрія), а також в медичних та професійних цілях, де потрібні зображення з високою роздільною здатністю.

Конструкція ПЗЗ-елемента виглядає так: до



кремнієвої підкладки p-типу додаються канали з напівпровідника n-типу. Над каналами створюється електроди з полікристалічного кремнію вкриті

ізолюючим прошарком з оксиду кремнію. Після подачі на такий електрод електричного потенціалу, в збідненій зоні під каналом n-типу створюється потенціальна яма, яка призначена зберігати електрони. Фотони, що проникають в кремній, призводять до генерації електронів, які притягаються потенціальною ямою і залишаються в ній. Чим яскравіше світло - тим більше фотонів, а отже і більший заряд ями. Потім треба зчитати значення цього заряду, який називається фотострумом, і підсилити його.

Зчитування фотострумів ПЗЗ-елементів здійснюється послідовними регістрами зсуву, які перетворюють рядок зарядів на вході в серію імпульсів на виході. Дана серія є аналоговий сигнал, який надалі надходить на підсилювач.

За допомогою цього регістру можна перетворити сигнал рядка ПЗЗ-елементів в аналоговий сигнал. Послідовний регістр зсуву в ПЗЗ-матрицях реалізується за допомогою тих же самих ПЗЗ-елементів, об'єднаних в рядок. Робота такого пристрою базується на здатності приладів з зарядовим зв'язком обмінюватися зарядами своїх потенціальних ям. Обмін здійснюється завдяки наявності спеціальних електродів переносу, розташованих між сусідніми ПЗЗ-елементами. При подачі на найближчий електрод більшої напруги (більшого потенціалу) заряд «перетікає» з потенційної ями під електрод.

Подача потенціалів на електроди перенесення синхронізована таким чином, що переміщення зарядів потенціальних ям всіх ПЗЗ-елементів регістру відбувається одночасно. І за один цикл перенесення ПЗЗ-елементи ніби «передають по ланцюжку» заряди зліва направо (або ж справа наліво). А крайній ПЗЗ-елемент віддає свій заряд пристрою, розташованого на виході регістра - підсилювачу.

## **16.2. Характерні значення часу транспортування та зберігання заряду.**

Загальний час затримки, який здатні забезпечити ПЗЗ, не може бути надто великим. Справа в тому, що кількість зарядів, що зберігається в потенціальній ямі, поступово змінюється через їхню рекомбінацію з основними носіями підкладки та їхню екстракцію в підкладку. В результаті кількість зарядів в кожній з потенціальних ям намагається вирівнятися, прямуючи до деякого середнього значення, і записаний в них сигнал поступово “стирається”. Цим і визначається максимальний час затримки, який в сучасних ПЗЗ досягає 10 – 20 мс. З іншого боку, швидкодія ПЗЗ визначається швидкістю перетікання носіїв від одного затвора до іншого, тривалість цього процесу складає кілька наносекунд. Тому максимальна частота затримуваних за допомогою ПЗЗ сигналів не може перевищувати кількох десятків мегагерц.

### 16.3. Конструктивні особливості 3-фазних та 2-фазних приладів з зарядовим зв'язком.

Конструктивні особливості 3-фазних та 2-фазних приладів з зарядовим зв'язком.

Нехай біля затвору розташований ще один і на нього поданий позитивний потенціал, при чому, більший, ніж на перший. Якщо затвори розташовані достатньо близько, їх потенційні ями об'єднуються і електрони, що знаходяться в одній ямі, переміщуються у сусідню якщо її потенціал вище.

Тобто, якщо ми маємо ланцюг затворів, то можна, подаючи на них відповідні керуючі напруги, передавати локалізований

зарядовий пакет вздовж такої структури.

Для керування ланцюгом затворів будь-якої довжини достатньо усього 3 шин (вл-ть самосканування). Один-передавальний, другий-приймальний, третій-ізолюючий, що розділює пари приймаючих та передавальних одна від одної, при чому однойменні затвори таких трійок можуть бути з'єднані між собою в одну тактову шину, яка потребує лише один зовнішній вивід. Це і є найпростіший 3-фазний регістр зсуву на ПЗЗ. (на рис.-у кожній ямі заряд різний!)

Для локалізації зарядових пакетів у поперечному напрямку формуються стоп-канали - вузькі полоски з підвищеною концентрацією основної легуючої домішки, що йдуть вздовж каналу переносу. Суть в тому, що від концентрації легуючої домішки залежить, при якій конкретній напрузі на затворі під ним утвориться об'єднана область.

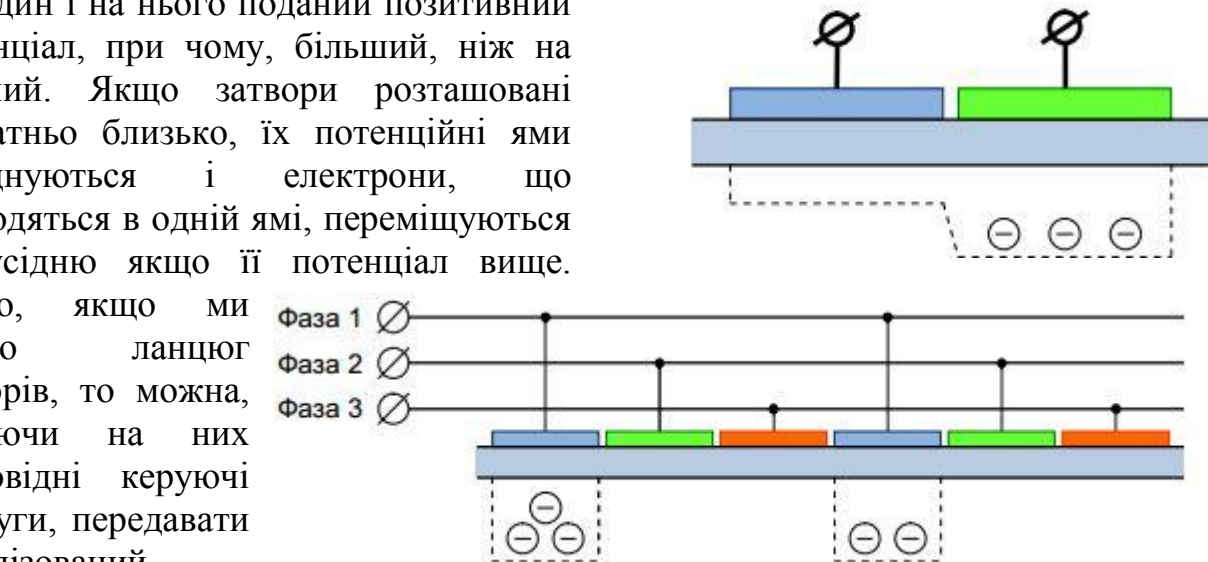


Рис. 1д. Вид на регістр «сверху». Канал переноса в боковом направлении ограничивается стоп-каналами

## 17. Надійність інтегральних схем. Частота відмов. Ймовірність безвідмовної роботи. Крива відмов.

**Надійність** - це складне комплексне поняття, за допомогою якого оцінюють такі найважливіші характеристики виробів, як працездатність, довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, відновлюваність та інші. **Надійність** - властивість об'єкта або технічного пристрою виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають заданим режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування.

**Відмова** - подія, що полягає в порушенні працездатності системи (елементу) тобто переходу її з справного в несправний стан. Розрізняють *повні* (катастрофічні) відмови – повне порушення працездатності, та *умовні* (поступові) відмови – вихід деяких показників за припустимі межі.

В основі повних відмов ІС лежать замикання та обриви у тих чи інших частинах ІС, то в основі умовних – повільні зміни електропровідності та інших електрофізичних властивостей окремих ділянок ІС.

Короткі замикання з'являються в результаті доторкання з'єднальних провідників між собою або з корпусом внаслідок вібрацій, ударів; чи локального перегріву і проплавленні нагрітої ділянки; чи проникнення провідної речовини крізь пори в діелектрику. Також КЗ можуть бути спричинені електрохімічною корозією (формування окислів, що є провідниками), інтерметалічними з'єднаннями та електроміграцією (зменшення товщини провідника – міграція атомів внаслідок дії електричного поля чи температури).

Повна відмова – це результат лавиноподібного накопичення тих змін, що досі проявлялися у вигляді дрейфу параметрів.

Головну роль у появі умовних відмов грають процеси на межі кремнію із захисним окислом. Йони в окислі мігрують під дією електричного поля та температури та утворюють провідні канали, що впливають на зворотні струми р-п переходів та величину пробивної напруги.

### Методи оцінки відмов

Використовується статистичний метод – випробування партій приладів на строк роботи. Якщо в партії з  $N$  шт. за час  $t$  відбулось  $n$  відмов, то ймовірність відмови в одиницю часу оцінюють як:

$$\lambda [\text{ч}^{-1}] = \frac{n}{Nt}$$

де  $\lambda$  – середня частота відмов.

Знаючи величину  $\lambda$  можна оцінити **ймовірність безвідмовної роботи ІС протягом заданого часу експлуатації:**

$$P = e^{-\lambda t}$$

Отже якою б малою не була  $\lambda$  з плином часу ймовірність безвідмовної роботи прямує до нуля.

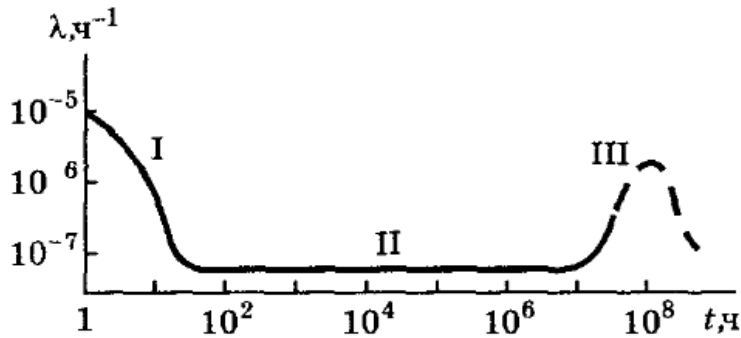
Якщо представити система складається з  $N$  елементів, кожен з яких характеризується власним значенням  $\lambda_i$ , то ймовірність безвідмовної роботи:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda_i t})$$

Середній строк роботи приладу прийнято отримувати з умови  $\lambda t = 1$ :

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda}$$

Взагалі величина  $\lambda$  не постійна – вона змінюється з плином часу:



На кривій  $\lambda(t)$  виділяють три характерні ділянки:

- ділянка I, на якій проявляються грубі помилки під час збирання, забруднення поверхні ітд;
- ділянка II, на якій  $\lambda = const$ , тобто відмови обумовлені випадковими, неконтрольованими причинами;
- ділянка III на якій  $\lambda$  знову зростає внаслідок неминучого старіння приладу тобто проявляються ті хімічні та фізико-хімічні процеси, яких не позбавлена жодна НП-структура (взаємна дифузія різнорідних матеріалів, радіаційні дефекти, обумовлені космічним випромінюванням ітд).

Середній строк роботи  $t_{cp}$  відповідає межі між ділянками II і III. Ділянка I зазвичай проходиться шляхом тренування приладів у виробника перед продажом (після механічних, електричних та кліматичних випробувань протягом сотень годин).

Зараз величина  $\lambda$  дуже маленька і наприклад для партії 1000 шт чекати 2-3 відмови треба буде близько 10 років. Використовувати більші партії економічно не вигідно.

Тому використовують метод прискорених випробувань. Закон Ареніуса каже, що швидкість хімічних і фізико-хімічних процесів пов'язана з температурою експоненціально, звідки випливає, що середній строк роботи при підвищеній температурі буде менший ніж при нормальній:

$$t_{пр} = t_n \exp \left[ -\frac{W_a}{k} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_{пр}} \right) \right]$$

де  $W_a$  – енергія активації процесу, а температури є абсолютними (у Кельвінах).

Однак останнім часом при  $\lambda < 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ , і такий метод стає незручним. Тоді починають застосовувати неруйнівні (а часто і безконтактні) методи оцінки, які є індивідуальними для кожного виробу – дослідження у інфрачервоному випромінюванні, рентгеноскопія, електронна мікроскопія, а також вимірювання надлишкових шумів, які характеризують якість контактів.