

## 1. Методи виготовлення тонких шарів та плівок.

Виготовлення плівкових структур заданої конфігурації здійснюється за допомогою трьох методів (рис.11.2):

- *неруйнівної або змінної маски,*
- *руйнівної (одноразової) або контактної маски,*
- *променевої обробки тонких шарів речовини по заданій програмі.*

В перших двох методах маска (трафарет) перекриває частину потоку атомів речовини, що повинна осідати на підкладинці, тобто маска дозволяє точно відтворювати спроектовану топологію тонкоплівкової структури або витравлювати частину попередньо нанесеної плівки. У третьому методі електронний, іонний або лазерний сфокусовані промені при скануванні поверхні попередньо нанесеної плівки витравлюють на ній по заданій програмі певний рисунок або стимулюють проведення певних реакцій.

*Неруйнівна маска* виготовляється заздалегідь окремо від підкладинки. Вона являє собою тонкий шар речовини (здебільшого - це нікельована фольга з берилієвої бронзи) товщиною  $80\div 100$  мкм з отворами, розміри форма й розташування яких визначається топологією ІМС, природою, функціональним призначенням і параметрами окремих її елементів. Неруйнівна маска накладається на підкладинку і крізь її отвори наноситься на підкладинку речовина, необхідна для створення даного елемента мікросхеми (метал, напівпровідник, діелектрик). Її позитивною рисою є те, що вона може використовуватись декілька разів. Проте вона має обмежену точність відтворення розмірів елементів  $\pm 5$  мкм, що не завжди задовольняє розробників ІМС. Тому для більш точного відтворення розмірів окремих елементів при виготовленні ІМС використовується метод руйнівної маски.

*Метод руйнівної (контактної) маски* полягає в тому, що на підкладинку наноситься допоміжний шар речовини, в якому утворюються отвори. Форма цих отворів визначається формою елементів ІМС, що виготовляються. Крізь ці отвори можна наносити шари певних речовин або витравлювати вікна (оголяти підкладинку) у суцільному заздалегідь нанесеному на підкладинці шарі речовини (рис.11.3). Після цього руйнівну маску розчиняють у спеціальних розчинниках, котрі не впливають на нанесені крізь маску або заздалегідь осаджені до створення маски матеріали. Формування руйнівної маски здійснюють за допомогою методу *фотолітографії*.

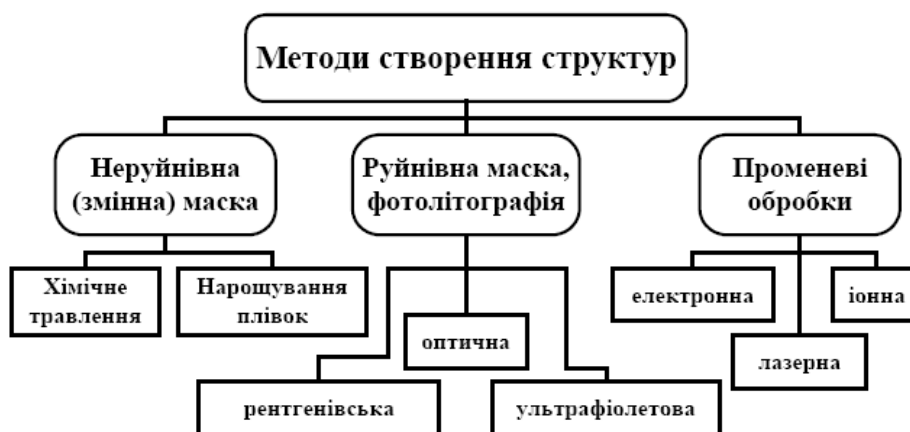


Рис.11.2. Методи створення конфігурацій плівкових структур.

Метод контактної (руйнівної) маски забезпечує кращу за метод неруйнівної маски точність відтворення форм і якості країв структур. Наприклад, мінімальна ширина лінії, що забезпечується методом руйнівної маски ( $\Delta r \sim \lambda / \sin \alpha$ ), при використанні видимого світла ( $\lambda \sim 0.5 \text{ мкм}$ ), становить  $\sim 2 \text{ мкм}$ , при використанні ультрафіолетового випромінювання становить  $\sim < 1 \text{ мкм}$ , а при використанні рентгенівських променів  $\sim 0.03 \text{ мкм}$ .

Для одержання конфігурацій елементів із тонких плівок використовуються також гравірування за допомогою лазерного або електронного променів. На порядку денному стоїть питання про гравірування також за допомогою іонних променів.

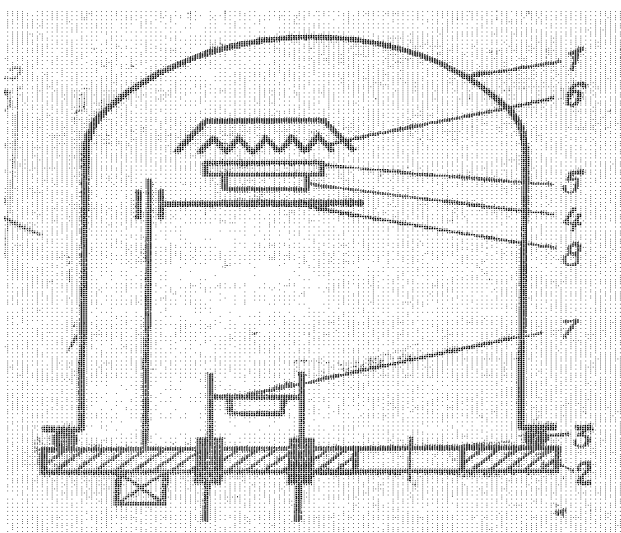
## 2. Механізми утворення і структура тонких плівок.

Тонкие пленки не только являются основой тонкопленочных ГИС, но широко используются и в полупроводниковых интегральных схемах. Поэтому методы получения тонких пленок относятся к общим вопросам технологии микроэлектроники.

Существует три основных метода нанесения тонких пленок на подложку и друг на друга: термическое (вакуумное) напыление, ионно-плазменное напыление и электрохимическое осаждение. Ионно-плазменное напыление имеет две разновидности: катодное напыление и собственно ионно-плазменное.

### **1. Термическое (вакуумное) напыление**

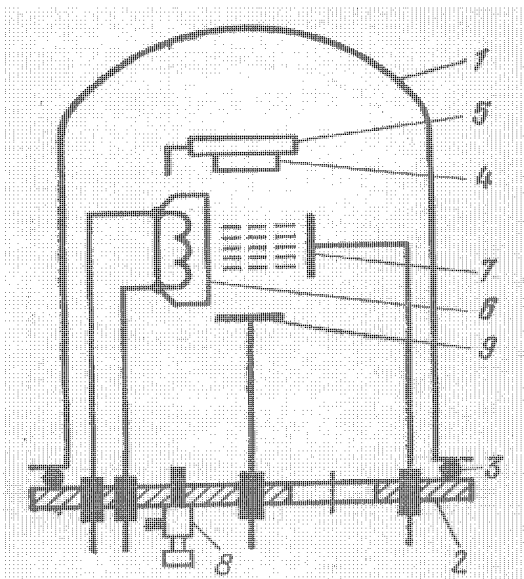
Схема этого метода показана на рис.. Металлический или стеклянный колпак 1 расположен на опорной плите 2. Между ними находится прокладка 3, обеспечивающая поддержание вакуума после откачки подколпачного пространства.



Подложка 4, на которую проводится напыление, закреплена на держателе 5. К держателю примыкает нагреватель 6 (напыление проводится на нагретую подложку). Испаритель 7 включает в себя нагреватель и источник напыляемого вещества. Поворотная заслонка 8 перекрывает поток паров от испарителя к подложке: напыление длится в течение времени, когда заслонка открыта. Для получения качественной пленки температура

подложки должна лежать в некоторых оптимальных пределах (обычно 200-400 °С). Скорость роста пленок в зависимости от ряда факторов (температура нагревателя, температура подложки, расстояние от испарителя до подложки, тип напыляемого материала и др.) лежит в пределах от десяти долей до десятков нанометров в секунду. Для того, чтобы атома газа, летящие от испарителя к подложке, испытали минимальное количество столкновений с атомами остального газа и тем самым минимальное рассеяние, в подколпачном пространстве нужно обеспечивать достаточно высокий вакуум. Критерием необходимого вакуума может служить условие, чтобы средняя длина свободного пробега в несколько раз превышала расстояние между испарителем и подложкой. Главными достоинствами рассмотренного метода являются его простота и возможность получения исключительно чистых пленок (при высоком вакууме). Однако у него есть и серьезные недостатки: трудность напыления тугоплавких материалов и трудность (а иногда невозможность) воспроизведения на подложке химического состава испаряемого вещества.

## 2. Ионно-плазменное напыление



В промежутке между электродом 9 – мишенью (с нанесенным на нее напыляемым материалом) и подложкой 4 действует независимый, «дежурный» газовый разряд. Разряд имеет место между электродами 6 и 7, причем тип разряда – несамостоятельный дуговой. Для этого типа разряда характерны: наличие специального источника электронов в виде накаливаемого катода (6), низкие рабочие напряжения (десятки вольт) и большая плотность электронно-ионной плазмы. Подколпачное пространство, как и при катодном напылении, заполнено нейтральным газом, но при более низком давлении ( $10^{-3} - 10^{-4}$  мм рт. ст.). Процесс напыления состоит в следующем. На мишень относительно плазмы (практически – относительно заземленного анода 7) подается отрицательный потенциал (2-3 кВ), достаточный для возникновения аномального тлеющего разряда и интенсивной бомбардировки положительными ионами плазмы. Выбиваемые атомы мишени попадают на подложку и осаждаются на ней.

Это затруднение преодолевается путем использования так называемого высокочастотного ионно-плазменного напыления. В этом случае на мишень наряду с постоянным отрицательным напряжением подается переменное напряжение высокой частоты (около 15 МГц) с амплитудой, несколько превышающей постоянное напряжение. Тогда во время большей части периода результирующее напряжение отрицательно; при этом происходит обычный процесс распыления мишени и на ней накапливается положительный заряд. Однако во время во время небольшой части периода результирующее напряжение положительно; при этом мишень бомбардируется электронами из плазмы, т. е. распыления не происходит, но зато компенсируется накопленный положительный заряд.

Начало и конец процесса напыления определяются подачей и отключением напряжения на мишени. При напылении диэлектрических пленок возникает затруднение, связанное с накоплением на мишени положительного заряда, препятствующего дальнейшей ионной бомбардировке.

Вариант реактивного (химического) ионно-плазменного напыления открывает те же возможности получения окислов, нитридов и других соединений, что и реактивное катодное напыление.

Преимущества собственно ионно-плазменного метода по сравнению с катодным состоят в большей скорости напыления и большей гибкости процесса (возможность ионной очистки, возможность отключения рабочей цепи без прерывания разряда и др.). Кроме того, на качестве пленок сказывается более высокий вакуум.

### **3. Электрохимическое осаждение**

Это метод получения пленок отличается от предыдущих тем, что рабочей средой является жидкость. Однако характер процессов сходен с ионно-плазменным напылением, поскольку и плазма, и электролит представляют собой квазинейтральную смесь ионов и неионизированных молекул или атомов. А главное, осаждение происходит также постепенно (послойно) как и напыление, т.е. обеспечивает возможность получения тонких пленок.

В микроэлектронике электрохимическое осаждение не является альтернативой термическому и ионно-плазменному напылению; оно дополняет их и сочетается с ними. В основе электрохимического осаждения лежит электролиз раствора, содержащего ионы необходимых примесей. Например, если требуется осадить медь, используется раствор медного купороса, а если золото или никель – растворы соответствующих солей.

Ионы металлов дают в растворе положительный заряд. Поэтому, чтобы осадить металлическую пленку, подложку следует использовать как катод. Если подложка является диэлектриком или имеет низкую проводимость, на нее предварительно наносят тонкий металлический подслой, который и служит катодом. Подслой можно нанести методом термического или ионно-плазменного напыления. Чтобы осуществить электрохимическое анодирование, окисляемую пленку металла следует использовать как анод, а электролит должен содержать ионы кислорода.

Большое преимущество электрохимического осаждения перед напылением состоит в гораздо большей скорости процесса, которая легко регулируется изменением тока. Поэтому основная область применения электролиза в микроэлектронике – это получение сравнительно толстых пленок (10 – 20 мкм и более). Качество (структура) таких пленок хуже, чем при напылении, но для ряда применений они оказываются вполне приемлемыми.

### 3. Літографічні процеси у мікроелектроніці.

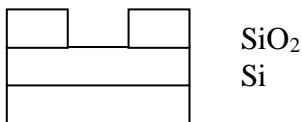
Одним із визначних технологічних процесів в мікроелектроніці протягом більш ніж 40 років продовжує зоставатись літографія. Літографія призначена для створення топологічного малюнку на поверхні монокристалічної кремнієвої пластини. Базовий літографічний процес представлений на рис.1 і включає в себе, принаймні 9 ступенів:

1. підготовка поверхні (промивка, сушка)
2. нанесення резисту (тонка плівка полімеру наноситься центрифугуванням)
3. сушка (видалення розчинника і перевід речисту в тверду розчинну фазу)
4. суміщення фотошаблону і експонування (позитивний резист під дією світла переходить в нерозчинну фазу)
5. проявлення резисту (промивка в розчиннику, що прибирає неекспонований резист)
6. стабілізуючий відпал (видалення залишків розчинника)
7. контроль і виправлення дефектів
8. травлення (безпосередній перенос малюнка маски на поверхню напівпровідникової структури)
9. видалення фоторезисту

Мінімальний розмір малюнка, який можна досягнути за допомогою тої чи іншої оптичної системи може бути оцінений з використанням відомої формули  $\sigma = k_1 \lambda / NA$ , де  $\sigma$ - роздільна здатність,  $k_1$  – константа, яка залежить від типу використовуваного резисту, типу літографічного процесу,  $\lambda$  – довжина хвилі світла,  $NA$  – чисельна апертура оптичної системи. Формула показує, що зменшення довжини хвилі або збільшення чисельна апертура дозволяє реалізувати більш високу роздільну здатність.

В технології напівпровідникових приладів важливе місце займають маски: вони забезпечують локальний характер напilenня, легування, травлення, а в деяких випадках і епітаксії. Будь-яка маска містить сукупність спроектованих отворів – вікон. Виготовлення таких вікон і є задача літографії.

#### **Оптична літографія:**



##### 1.Окислення

2.Нанесення фоторезисту. Фоторезист – полімерна рідина. Наноситься крапля фоторезисту =>на центрифугу 6-8тис. оберт/хв. В результаті товщина шару  $\approx 1$ мкм.

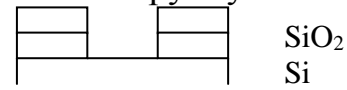
3.Сушка- близько години при  $T \approx 170 \div 200^{\circ}C$

##### 4.Експонування Рисунок майбутньої маски

виготовляється у вигляді фотошаблону (товста скляна пластинка, на якій нанесено непрозора плівка з необхідним рисунком в масштабі 1:1). Фотошаблон кладеться на фоторезисті експонується в проміннях кварцевої лампи.  $P(\text{світла}) \approx 1 \div 10 \text{ мДж/см}^2$  (інтегральна). Товщина

фоторезисту повинна бути  $\alpha(\phi/p) \leq 1/2 * \lambda$  (опромін), бо інакше утвор. стояча хвиля і фоторезист не буде експонуватися.

5. Проявка + змивка  $\exists$  позитивні та негативні фоторезисти. “+”-руйнується те що експонувалося (змивається при проявленні), “-” змивається те що не експонувалося.



6. Травлення окисного шару до Si (на Si травник не діє)

7. Змивка залишків фоторезисту

технологічних циклах фотолітографія використовується многократно. Тому  $\exists$  проблема суміщення фотошаблонів (допуск на суміщення долі мікронів). На фотошаблоні роблять спеціальні “відмітки” (наприклад хрестики), які переходять в рисунок на окислі та видні крізь фоторезист. Під мікроскопом їх суміщають з аналогічними відмітками на фотошаблоні.

**Рентгенівська** - Фотолітографія має ряд обмежень. Одні з обмежень стосується роздільної здатності, тобто мінімальних розмірів рисунка маски. Довжина хвилі ультрафіолет. - 0,2-0,3 мкм. Тому, яким би малим не був отвір,

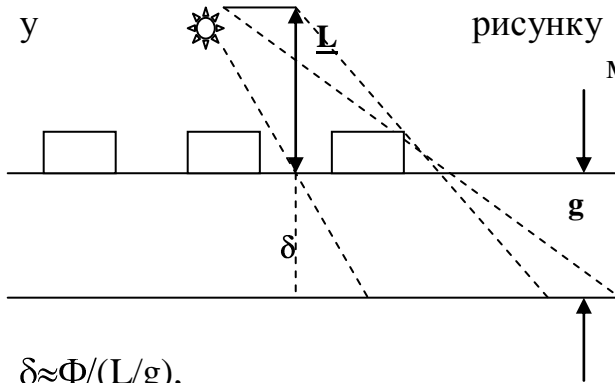


рисунок фотошаблону, розміри зображень не можуть досягти вказаних значень через дифракцію. Найбільш очевидний шлях - використання коротких хвиль (рентген. 1-2 нм). В якості джерела використовується  $\lambda = 0.473$  нм.  $\exists$  проблеми: 1) як зробити випромінення паралельним? якщо відсунути джерело то

$$\delta \approx \Phi / (L/g),$$

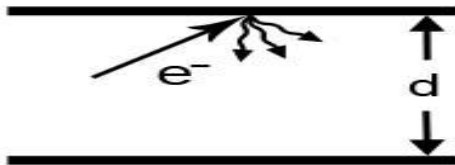
інтенсив. падає  $I \approx 1/R^2$  Тому роблять складнішу конструкцію: лампа з катодом, що обертається. 2) немає рентгенівської тіні. Тому для виготовлення шаблону необхідно, щоб коефіцієнти пропускання “затіненої” і незатіненої області відносилися як 1:4. Для виготовлення шаблонів використовується Si, SiC, SiN, B, Be

**Електронна** - Викор. для виготовлення шаблонів або потужних приладів далекого СВЧ діапазону. Сфокусований пучок електронів сканують по поверхні пластини, яка покрита резистом та керують інтенсивністю пучка. У точках, які повинні бути “засвічені” - ток пучка max, де “затемнені” min або 0. Діаметр пучка пропорційний току пучка. Одна зі зменшенням току зростає час експозиції. Тому збільшення роздільної здатності супроводжується збільшенням тривалості процесу. Одна з різновдностей електронної літографії заснована на відказі від резистивних масок, пучок взаємодіє на шар SiO<sub>2</sub> (в місцях “засвітки” шар травиться скоріше). Переваги: висока ступінь автоматизації, точності суміщення, роздільної здатності. Недоліки: мала продуктивність (кожен елемент окремо),  $\nu$  (сигнала)  $\approx 1$  МГц - складна технолог. реалізація, можуть виникати ефекти близькості (e потрапляє в полімер, гальмується, випромінює => починає рухатися в деякій області). Переекспонування (травимо ззовні) Недоекспонування (травимо зсередини).

#### 4. Явища переносу в тонких металевих плівках, залежність їх від товщини.

Тонкі плівки – плівки товщина яких  $d < 1$  мкм, коли  $d \approx l$  (10 – 50 нм) виникає (проявляється) класичний розмірний ефект ( $l$  – довжина вільного побігу). Внаслідок чого провідність плівки починає залежати від  $d$ .

$$\sigma = en\mu, \quad \mu = \frac{e}{m_{ef}} \tau - \text{рухливість, } \tau - \text{час релаксації.}$$



Якщо припустити, що головний механізм розсіяння – взаємодія з фотонами, то

$$\tau_{cp} = \frac{l}{v_{op}} v, \quad v \approx 1 - \text{кількість співударів до}$$

повної зміни імпульсу носієм. При  $d \approx l$ , з'являється ще один канал розсіяння на стінках. Вважатимемо, що розсіяння ізотропне (рівноймовірні напрямки

розльоту після розсіяння на стінці). Тоді  $\tau_s = \frac{d}{v_{op}}$  - час релаксації після

взаємодії з поверхнею.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_{cp}} - \text{сумарний час релаксації;}$$

$$\mu = \frac{e}{m_{ef}} \frac{\tau_s \tau_{cp}}{\tau_s + \tau_{cp}}$$

$$\mu_{ef} = \mu_0 \frac{1}{1 + l/d}, \quad \text{де } \mu_0 = \frac{e}{m_{ef}} \tau_{cp} - \text{рухливість в об'ємі.}$$

На величинах  $d < l$ , провідність зменшується зі зменшенням  $d$ .



$$\sigma = \sigma_0 \frac{1}{1 + l/d} - \text{провідність.}$$

При наявності контакту іншого металу до плівки проявляється таке контактне явище, як ефект Пельтьє - виділення або поглинання тепла при проходженні струму крізь контакт. Це пояснюється тим, що середня енергія носіїв залежить від їх енергетичного спектра, концентрації, механічного розсіяння і тому для різних провідників вона різна. При переході з одного провідника в інший носії або передають надлишкову енергію атомам, або поповнюють нестачу за рахунок їх рахунок (виділення або поглинання тепла).



Тепло Пельтье  $Q_n = \Pi q = \Pi It$ ,  $q$ - повний заряд,  $I$  – струм,  $\Pi$  – коеф. Пельтье.  
Знак  $\Pi$  змінюється при зміні напрямку струму, тоді змінюється і знак  $Q_n$ .  
Тепло  $Q_n \sim I$  і не залежить від  $R$  на відміну від теплоти Джоуля-Ленца.  
При  $T \neq 0$   $\Pi = \Delta\phi$  – контактна різниця потенціалів. (не вироджений електронний газ).

При  $T = 0$  (вироджений електронний газ)  $\Pi = 0$ .

## 5. Методи ізоляції ІМС.

Існують 4 типи ізоляції ІМС, а саме:

- за допомогою зворотно зміщених  $p-n$  переходів,
- за допомогою тонких плівок  $SiO_2$ ,
- за допомогою діелектричних шарів відмінних від  $SiO_2$ ,
- за допомогою повітряних проміжків.

### 1. Ізоляція за допомогою зворотно зміщених $p-n$ переходів

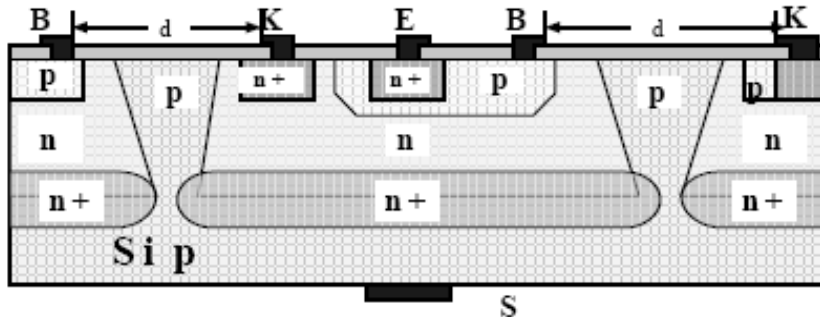


Рис.12.29. Поперечний розріз ІМС з ізоляцією за допомогою зворотно зміщених  $p-n$  переходів.

окремими елементами ІМС знаходяться  $p-n$  переходи. Якщо за допомогою зовнішнього джерела напруги зворотно змістити всі  $p-n$  переходи, то між ними не буде йти струм і вони служитимуть ізолюючими прошарками між окремими елементами ІМС. Для створення такої ізоляції, як це видно з рис.12.29, витрачається частина простору підкладки протяжністю  $d \times d$ , що

зменшує густину монтажу.

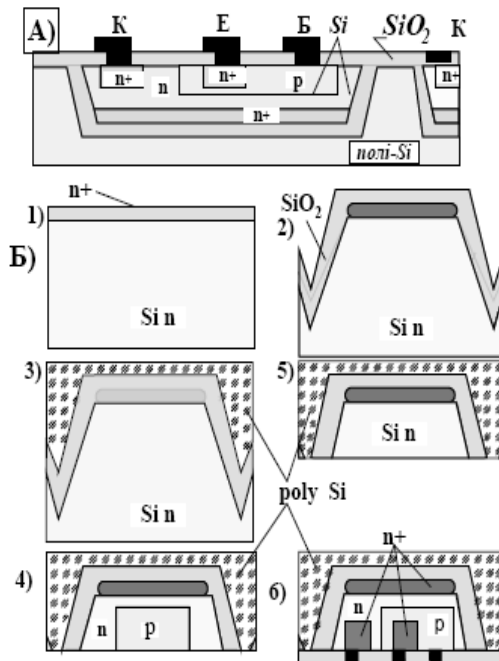


Рис.12.31. Поперечний переріз А) та етапи виготовлення  $SiO_2$  ізоляції ІМС Б) захованого шару (дифузія доворів); 2) заглибін та їх окислення; 3) нанесення полікремнію; 4) витравлення фасадної сторони пластинки Si; 5) створення базового шару; 6) створення колекторної та емітерної частин транзистора.

діодної ізоляції має також свої недоліки, а саме:

- необхідність використання зовнішнього джерела напруги для створення зворотного зміщення на  $p-n$  переходах між елементами ІМС;

На рис 12.29 зображений поперечний переріз ІМС з ізоляцією за допомогою зворотно зміщених  $p-n$  переходів. Цей різновид ізоляції називають також діодною ізоляцією. Видно, що між

Цей спосіб ізоляції приваблює тим, що не виникає потреби вводити додаткові технологічні операції. Дійсно, всі елементи ІМС транзистори, діоди, ємності, резистори та діодна ізоляція виготовляються у приповерхневій частині напівпровідникової підкладки у за допомогою однакової технології. Усе це разом із позитивними схемотехнічними якостями напівпровідникових елементів забезпечує широке практичне використання твердотільних напівпровідникових схем у мікроелектроніці. Проте метод

- складність еквівалентних схем, тому що потрібно додатково враховувати ємності зворотно зміщених  $p-n$  переходів;
- наявність гальванічних зв'язків між зворотно зміщеними  $p-n$  переходами тощо.

## 2. Ізоляція за допомогою тонких плівок $SiO_2$

Один із прикладів ізоляції за допомогою  $SiO_2$ , зображений на рис.12.31. Елементи схеми розміщуються в окремих комірках, ізольованих одна від одної шарами  $SiO_2$ . Технологія виготовлення ІМС з ізоляцією шарами  $SiO_2$  відрізняється від технології ІМС із діодною ізоляцією. Наведемо приклад створення такої системи. Вона складається з 6-тьох етапів.

На *першому етапі* легують захований  $n+$  шар і окислюють кремній. На *другому етапі* за допомогою фотолітографії і хімічного травлення витравлюють у  $Si$  пластинці заглибини, котрі потім окислюють. Вони ізолюють окремі частини ІМС. На *третьому етапі* усувають зайвий шар  $Si$  на фронтальному боці кристала. На *четвертому етапі* на тильну сторону полікремнієвої підкладки наносять масивний шар полікристалічного кремнію. Цей шар підвищує механічну міцність ІМС. На *п'ятому етапі* крізь отвори в спеціальній руйнівній масці на фронтальній поверхні методом термодифузії легують області  $Si$  для створення бази  $n+-p-n$  транзистора.

На *шостому етапі* поверхню знову окислюють, наносять фоторезист та переносять на нього з фотошаблону малюнок необхідних отворів. Після експонування витравлюють ці отвори. Крізь отвори здійснюють легування емітерної та колекторної областей транзистора та приєднують до них металеві контакти.

## 3. Ізоляція за допомогою діелектриків відмінних від $SiO_2$

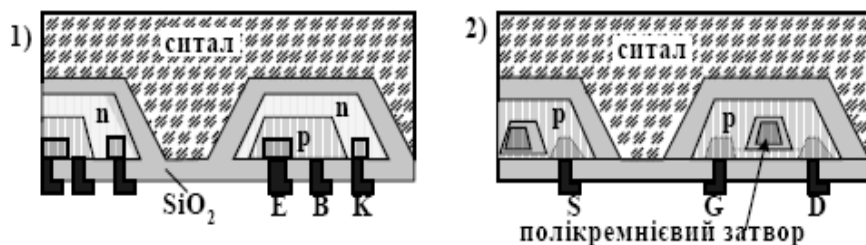


Рис.12.33. Ізоляцією ІМС за допомогою ситалу: 1) із  $n^+-p-n$  транзисторами і 2) із МОН транзисторами.

Замість  $SiO_2$  для ізоляції можна використовувати й інші діелектрики, наприклад, ситал. Щоб у системі не виникало додаткових напружень й ці діелектрики не

тріскались й не відлущувались, вони повинні мати близькі за величиною температурні коефіцієнти лінійного розширення до відповідних коефіцієнтів  $Si$ . Ситал відповідає таким вимогам й має значний коефіцієнт теплопровідності, що полегшує охолодження ІМС. На рис.12.33 зображено переріз  $n+-p-n$  і МОН транзисторів ІМС ізольованих ситалом.

## 4. Ізоляція повітряними проміжками

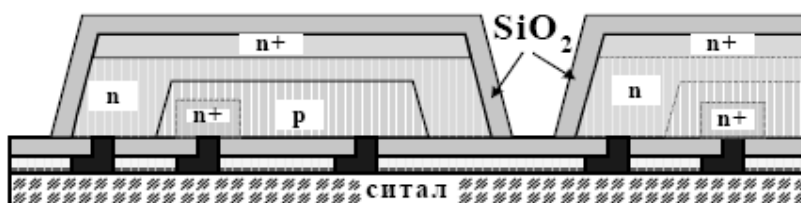


Рис.12.34. Мезоструктура з ізоляцією повітряними проміжками.

Іноді для ізоляції використовують повітряні проміжки між окремими елементами ІМС. Приклад такої ізоляції зображений на рис.12.34. Вона

виготовляється так. Спочатку виготовляють ІМС на  $Si$  підкладинці і захищають за допомогою  $SiO_2$ . Потім їх припаюють до скляної або ситалової пластинки. Після цього за допомогою фотолітографії створюють вікна на тильному боці в руйнівній масці і крізь ці вікна витравлюють необхідний профіль мезоструктури з повітряними проміжками, показаний на рис.12.34. Найчастіше метод повітряної ізоляції застосовують при виготовленні ІМС на основі  $Si$  на ситалі або на сапфірі. Спочатку на сапфіровій підкладинці формують ізольовані за допомогою  $SiO_2$  острівці  $Si$ . Для їх формування застосовують методи епітаксiального вирощування монокристальних плівок. Потім на цих острівцях  $Si$  виготовляють окремі ІМС груповим методом і здійснюють їх з'єднання. Проте найбільш перспективними з точки зору збільшення густини монтажу є комбіновані методи ізоляції елементів ІМС.

## **6. Методи визначення структури та складу тонких плівок.**

Структуру плівок можна визначити методами рентгенофазного аналізу і електронної мікроскопії. Фотоелектронна і ІЧ спектроскопія дають інформацію про типи хімічних зв'язків. Склад тонких плівок можна визначити методом Оже спектроскопії.

**Оже-спектроскопія (о-сп.)** Це область електронної спектроскопії, в основі якої лежить вимірювання енергії та інтенсивності струмів оже-електронів, а також аналіз форми ліній спектрів оже-електронів, емітованих атомом, молекулою чи твердим тілом внаслідок о-еф. Енергія оже-електронів визначається природою емітуючих їх атомів і взаємодією цих атомів з оточенням, що призводить до змін енергії оже-електронів. Тому по о-сп. Визначають елементний склад приповерхневих шарів твердого тіла, отримують інформацію про міжатомні взаємодії, виконують хім.аналіз газів. о-сп. використовують також для дослідження механізму о-еф., основних і збуджених станів двічі іонізованих атомів тощо. Аналіз елементного складу проводиться шляхом співставлення о-сп. з табличними даними. Положення максимуму в енергетичному спектрі оже-електронів несе інформацію про хім.природу атомів, а його амплітуда – про їх концентрацію. Взаємодія атома з його оточенням проявляється у формі оже-піків та їх енергетичних зсувів.

В о-сп. атоми збуджують електронними, фотонними(рентгенівськими) та іонними пучками; відповідно, розрізняють електронну (ЕОС), рентгенівську(РОС) та іонну(ІОС) о-сп. Реєструють о-сп. за допомогою оже-спектрометрів.

### **Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія.**

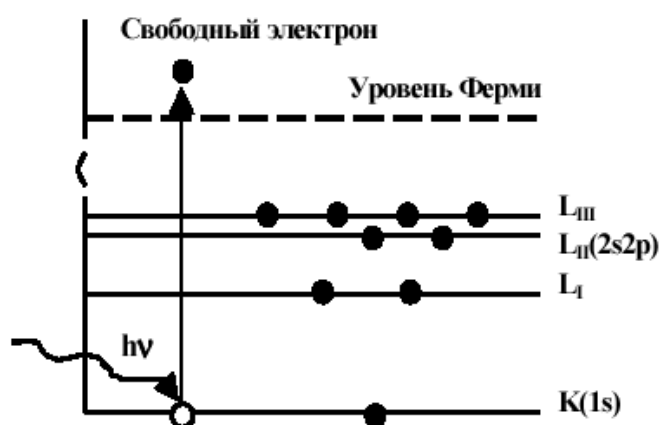


Рис. 6.10. Энергетическая диаграмма РФС

При опроміненні поверхні речовини фотонами можуть протікати різні процеси : утворення фотоелектронів, розсіяння фотонів, фото десорбція атомів і молекул з поверхні. Зміст РФС – отримання фотоелектронних спектрів, тобто вимірювання енергії внутрішнього чи валентного електрона, що вибивається квантом ел-магн. ви промін.

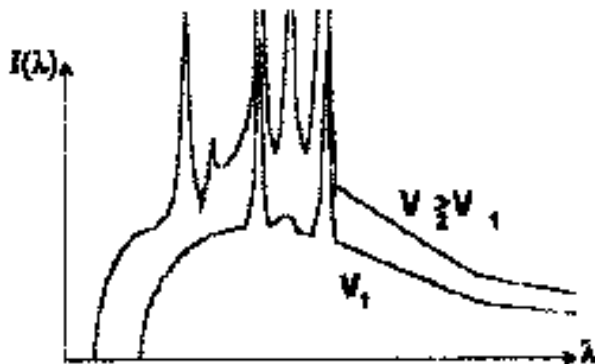
В спектрометрі монохроматичний пучок рентг.випром. падає на досліджувану речовину, атоми якого поглинають фотони. Зв'язаний електрон

переходить у вільний стан і вилітає за межі зразка з  $E_{\text{кін}}=h\nu-E_{\text{зв}}$ . Електрони збуджуються з усіх рівнів, на яких  $h\nu>E_{\text{зв}}$ . Знаючи  $h\nu, E_{\text{кін}}$ , що вимірюється за допом. ел. спектрометра, можна визначити енергію зв'язку. Глибина виходу вибитих електронів визначається довжиною вільного пробігу відносно непружних зіткнень (1-10нм). Ідеальне джерело рентг. випром. Для РФС має давати монохроматичне випром. з достатньо високою енергією. Монохроматичність необхідна, оскільки ширина лінії рентг. випром. впливає на ширину фотоелектронної лінії, від якої залежить роздільна здатність.

Для виділення і фокусування фотоелектронів викор. Магнітні чи електростатичні енергоаналізатори. З метою запобігання розсіяння електронів на молекулах залишкових газів аналізатора необхідно підтримувати вакуум не гірше  $10^{-3}$  Па.

Для отримання квантів високої енергії для РФЕС викор. рентгенівські трубки  $h\nu=eU$  і синхротронне випромінювання (електрон, рухаючись у циклічному прискорювачі, при  $v\sim c$  починає випромінювати у вузькому куті) Потоки рентг. випром. від синхротронного джерела у  $10^4$  разів більше, ніж від рентг. джерела із анодом, що обертається.

Кожна речовина має притаманний їй характеристичний спектр рентгенівських променів (р.пр.), що виникає при збудженні електронів



Характеристичний спектр рентгенівських променів при двох напругах на катоді рентгенівської трубки  $V_1$  і  $V_2>V_1$

глибоких оболонок атома, будова яких однакова у атомів з різними атомними номерами і не змінюється при хімічних реакціях і утворенні сплавів.

Першою стадією збудження р.пр. є утворення вакансії на R, L, M,... атомних шарах. Другою – перехід електронів атома із периферійних оболонок на вакансію глибинної електронної оболонки.

Спектральні лінії однієї і тієї серії зсуваються в бік менших  $\lambda$  із зростанням Z по закону Мозлі  $\sqrt{\nu}=C(Z-a)$  C,a- сталі.

**До основних методів нарощування тонкої плівки на підкладці відносять:**

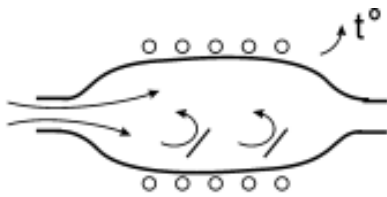
- 1) Вакуумна технологія – 3 етапи:
  - a) Випаровування речовини з метою отримання пари - атомарного потоку.
  - b) Перенос пари в вакуумний простір.
  - c) Конденсація пари на підкладці.
- 2) Катодне напилювання.
- 3) Йонно - плазмове напилювання.
- 4) Магнетронне розпилення.

5) Епітаксія .

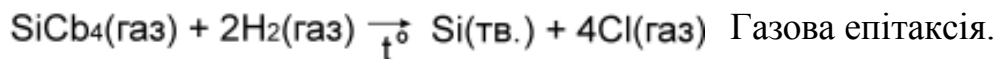
Типи епітаксії : гомоепітаксія (на підклад. певного матеріалу росте цей же матеріал). Та гетероепітаксія (на підкладинці певного матеріалу росте інший матеріал)

Базових епітаксійних процесів є 3:

- 1) Осадження з парової фази в т.ч. і метод газо – фазної епітаксії з металоорганічних сполук.
- 2) Молекулярно-променева епітаксія. Найпоширеніша для GaAs
- 3) Рідинна. (Основна ознака, що це епітаксійний процес, а не процес росту кристалу, це та, що процес відбув. Нижче температури плавлення.)



Найважливіша проблема епітаксії – співпадіння сталих крист. ґраток. Треба підбирати пари, для яких  $(b-a)/a \sim 1\%$



Досягають ламінарного потоку ( $Re < 2000$ ) і вибирають певн. профіль, де концентрація  $\text{SiCl}_2$  стала

$$y = (D\tau X/Re)^{1/2}, \quad Re = (D\tau V\rho)/\eta$$

Кінетика хім. реакц. зал. від температури.

Рідинна епітаксія.

Використовують. для вирощування GaAs для оптичних приладів, та для вирощування інших матеріалів. АЗВ5. В якості розчинників беруть Ga, In, Sn, Pt.

## 7. Основні задачі та напрямки розвитку мікроелектроніки.

Мікроелектроніка розв'язує три основних задачі:

- створення складних мініатюрних надійних ІМС із малим часом затримки сигналів;
- усунення технологічних труднощів виготовлення складних надійних ІМС;
- зниження собівартості ІМС.

Розрізняють такі напрямки розвитку мікроелектроніки:

- дискретна,
- інтегральна,
- функціональна електроніка,
- наноелектроніка.

Ці напрямки зображені на схемі (рис.1.1)

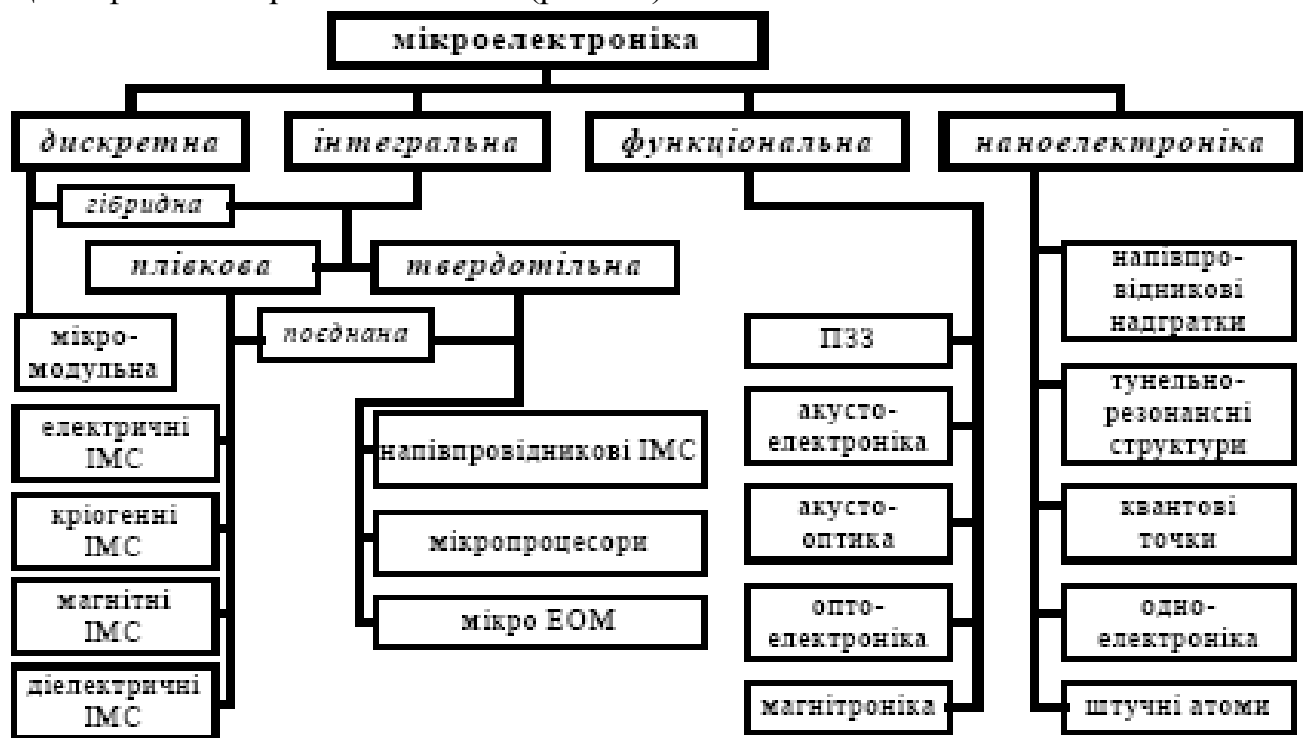


Рис.1.1. Схема основних напрямків розвитку мікроелектроніки

**Дискретна МЕ** являє собою перший етап мікромініатюризації окремих елементів електронної апаратури та раціонального компактного її монтажу. Вона забезпечує лише перший ступінь інтеграції.

**Модульна МЕ** являє собою другий етап конструювання електронної апаратури з компактних стандартних модулів, за допомогою яких здійснюється *схемотехнічна уніфікація й інтеграція*. **Інтегральна МЕ** являє собою третій етап конструювання електронної апаратури. В ній основною складовою частиною замість окремого елемента служить *інтегральна мікросхема (ІМС) або інтегральна схема (ІС)*, котра складається з багатьох елементів. **Інтегральною схемою (ІС) або інтегральною мікросхемою (ІМС)** називають мікроелектронний пристрій, який має такі властивості:



- складається із з'єднаних між собою багатьох елементів із високою густиною монтажу, який може перевищувати 105 елементів на одному кристалі (чіпі);
- виконує певну функцію перетворення й обробки сигналів;
- може розглядатись при її використанні, як єдине ціле, тому що окремі елементи починають втрачати свою специфічність;
- виготовляються в єдиному технологічному циклі.

До складу ІМС входять її елементи та компоненти. Вони створюються за допомогою групової технології виготовлення ІМС.

Тому в процесі створення й експлуатації ІМС має місце не тільки *схемотехнічна уніфікація і інтеграція, але й технологічна інтеграція*, що полягає в груповій технології виготовлення елементів і ІМС.

*Елементом ІМС* називається її частина, котра реалізує функцію будь-якого простого радіоелемента, наприклад, резистора, транзистора, конденсатора, діода, індуктивності тощо. Він не може бути виділений із ІМС, як окремий самостійний прилад, тому що виготовляється груповим методом неподільно з ІМС. *Компонентом ІМС* називається її частина, котра виконує в ІМС певну функцію, проте на відміну від елемента ІМС її компонент іноді може бути самостійним приладом перед монтажем ІМС, наприклад, навісні елементи гібридних ІМС такі, як транзистори тощо.

**Напівпровідниковою МЕ** називається МЕ, в якій використовуються напівпровідникові ІМС, в яких усі елементи і міжз'єднання, виконані в об'ємі (або на поверхні) напівпровідника. Досить часто для готового виробу використовують термін **кристал** або **чіп**, розуміючи при цьому виготовлений напівпровідниковий прилад і мікросхеми без зовнішніх відводів і корпусу.

**Плівкова мікроелектроніка** використовує плівкові ІМС. У плівкових ІМС усі елементи і міжз'єднання виготовляються у вигляді плівок речовини. В залежності від типу активного елемента розрізняють такі різновиди плівкових ІМС: *напівпровідникові, криогенні*, в яких використовується надпровідність, *магнітні, діелектричні* тощо.

*Гібридною ІМС* називають ІМС, до складу якої входять плівкові пасивні елементи - резистори та конденсатори і навісні активні елементи - транзистори та діоди.

*Поєднаною ІМС* називають ІМС, до складу яких входять твердотільні активні елементи і пасивні плівкові елементи. Вона має позитивні якості твердотільних напівпровідникових активних елементів і позитивні якості плівкових пасивних елементів.

ІМС характеризуються **ступенем інтеграції**. Ступенем інтеграції ІМС прийнято називати логарифм кількості елементів на кристал (на чіп) у ІМС. В таблиці 1.1 наведено 4 типи ІМС із різним ступенем інтеграції.

Назва	Кількість елементів на чіп (N)	Ступінь інтеграції lgN
ІМС (ІС)	20 ÷ 35	1,3 ÷ 1,5
СІМС (середні)	35 ÷ 100	1,5 ÷ 2,0
ВІМС (великі)	100 ÷ 1000	2 ÷ 3
НВІМС (надвеликі)	> 1000	>3

Сучасні надвеликі інтегральні мікросхеми (НВІС) наближаються до граничного ступеня інтеграції, коли починаються обмеження завдяки розмірним ефектам. Тому одним із напрямків подальшого розвитку мікроелектроніки є **функціональна електроніка (ФЕ)**.

**В функціональній електроніці (ФЕ)** носієм інформації служить багатовимірний сигнал, параметрами якого керують статичними або динамічними неоднорідностями середовища, що виникають під дією керуючого сигналу. В ФЕ повністю втрачаються особливості окремого елемента й має місце інтеграція функцій, котрі повинна виконувати інтегральна схема функціональної електроніки. Прикладами приладів ФЕ можуть бути: лінза, випрямляч змінного струму, що використовує ефект Зеебека, оптичний процесор, генератор Ганна, генератор, що використовує ефект Джозефсона, тощо.

**В наноелектроніці (НЕ)** використовуються нові діапазони частот, зокрема, оптичний, квантові особливості транспорту носіїв, зокрема, квантові розмірні ефекти, резонансне тунелювання, одноелектронні процеси, балістичні особливості руху носіїв заряду тощо. Це дає можливість розробляти технологію виготовлення наноструктур, яка дозволяє зменшити розмір елемента і збільшити ступінь інтеграції.

## 8. Розмірні ефекти в тонких плівках.

1. **Класичний розмірний ефект** виникає тоді, коли один з розмірів зразку стає меншим за довжину вільного пробігу носіїв ( $l=10-50$  нм)  $d \leq l$ . Це призводить до появи ще одного механізму розсіяння на стінках. Внаслідок цього зменшується ефективна довжина пробігу, що в свою чергу призводить до збільшення питомого опору зразка.

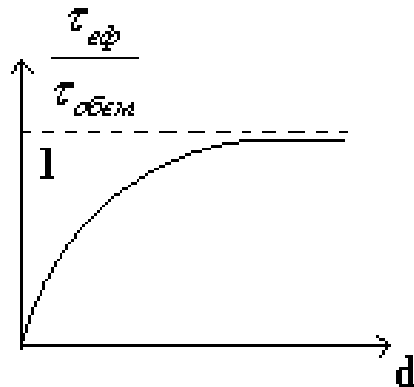
Провідність:  $\sigma = en\mu$ , де  $\mu = \frac{e}{m^*} \tau$  - рухливість.  $\tau$  - час релаксації, за який функція розподілу після деякого збудження повернеться в рівноважний стан,

$m^*$  - ефективна маса. Будемо вважати, що основний канал розсіяння - взаємодія з

оптичними фононами. Тому  $\tau_\phi = \frac{l}{v_{др}}$ , де

$v \approx 1$  - кількість зіткнень, при яких носій повністю змінює імпульс,  $v_{др}$  - дрейфова швидкість. Коли виникає розсіяння на стінках (розсіяння ізотропне-рівномірні

напрямки розльоту), то  $\tau_{cm} = \frac{d}{v_{др}}$  - час релаксації після взаємодії із стінкою.



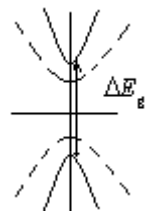
Матимемо сумарні вирази для часів релаксації:  $\frac{1}{\tau_{ef}} = \frac{1}{\tau_\phi} + \frac{1}{\tau_{cm}}$ , для рухливості:

$$\mu = \frac{e}{m^*} \tau_{ef} = \frac{e}{m^*} \tau_\phi \left( \frac{1}{1 + \frac{\tau_\phi}{\tau_{cm}}} \right) = \frac{e}{m^*} \tau_\phi \left( \frac{1}{1 + \frac{l}{d}} \right) = \mu_0 \left( \frac{1}{1 + \frac{l}{d}} \right). \text{Тобто при}$$

деяких  $d \approx l$  провідність починає зменшуватися. Умова існування класичного розмірного ефекту:  $\Lambda_{деБройля} \leq d \leq \lambda$ .

2. **Квантовий розмірний ефект** виникає тоді, коли розміри зразка  $d \leq \Lambda_{деБройля}$  довжину хвилі де Бройля  $\Lambda_{деБройля} = \frac{h}{p} = \frac{12.25}{\sqrt{E}}$ .

Тоді енергія носіїв:  $E = \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2 + (\frac{\pi n}{d})^2)$ , а ізоенергетична поверхня являє собою набір площин, відстань між якими



$(\frac{\pi}{d})^2$ . Змінюються: енергетична структура (з'являються підзони),

змінюється ширина забороненої зони  $\Delta E_g$ , густина електронних станів (вона перестає залежати від енергії носіїв і починає залежати від товщини зразка), зміна концентрації носіїв заряду, довжина екранування електричного поля. З'являється залежність часу релаксації носіїв заряду від  $d$ . В н/п класичний ефект важко спостерігати, бо ефективна маса н/п набагато менша за ефективну масу металу.

- Зникає надпровідність, коли розміри зразка  $d$  стають меншими за глибину проникнення магнітного поля в напівпровідник ( $d < \lambda_L = \sqrt{mc^2 / 4\pi\mu n_s e^2}$ , де  $n_s$  - концентрація надпровідних електронів,  $\mu$  - магнітна проникливість) або меншими за джозефсонівську глибину проникнення ( $d < \lambda_J = \sqrt{\Phi_0 c / 8\pi^2 J_c \lambda_L}$ ,  $J_c$  - критичний струм Джозефсона,  $\Phi_0 = hc/2e$  - квант магнітного потоку (флюксоїд)).
- Відбувається інтенсивне тунелювання, коли  $d < \hbar / 2 \cdot (2m(U - E))^{-1/2}$ , де  $U$  - висота потенціального бар'єра,  $E$  - енергія електронів, що тунелюють.
- Змінюється характер та структура магнітних доменів, коли розміри зразка стають меншими за розмір доменних стінок тощо.

Таким чином, розмірні ефекти змінюють особливості фізичних явищ у низькорозмірних 2D, 1D та 0D системах. Вони змінюють скейлінгові коефіцієнти та обмежують рівень мікромініатюризації мікроелектронних приладів. Це має місце, здебільшого, в зразках нанометрових розмірів. У зв'язку з цим необхідно створювати нові спеціальні наноелектронні прилади, в роботі яких будуть враховані і використані розмірні ефекти.

Умови появи квантового розмірного ефекту:

- по-перше, відстань між розмірними підзонами повинна бути більшою за тепловий розкид енергії квазічастинок

$$\Delta E_{v,v+1} > k_B T \quad (2.30)$$

Для напівпровідників при 300K ця умова виконується при товщинах  $d < 10^{-5}$  см.

- По-друге,  $\Delta E_{v,v+1}$  повинно бути більшим природної ширини енергетичних рівнів

$$\Delta E_{v,v+1} > \delta \varepsilon \quad (2.31)$$

За допомогою співвідношення невизначеностей оцінка дає  $\delta \varepsilon > 2\pi\hbar/\tau$ , де  $\tau$  - середній час життя на даному енергетичному рівні. Припустимо, що  $\tau = \mu m/e$ , тоді

$$\Delta E_{v,v+1} > 2\pi\hbar/\tau = 2\pi\hbar e/\mu m \quad (2.32)$$

Для напівпровідників із великими рухливостями носіїв, коли  $\mu > 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , ця умова виконується при  $d < 5 \cdot 10^{-6}$  см.

- По-третє, концентрація носіїв заряду  $n$  повинна бути не дуже великою, щоб затовнювалась лише 1-ша розмірна підзона, що має місце при умові

$$n < g_1 = 3\pi/2d^3 \quad (2.33)$$

де  $g_1 = 3\pi/2d^3$  - концентрація станів у 1-й розмірній підзоні.<sup>4</sup> При  $d \sim 10^{-5}$  см ця умова виконується, коли концентрації носіїв у зразку менша за  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> ( $n < 10^{16}$  см<sup>-3</sup>). Вона може бути виконана у невироджених напівпровідниках при низьких температурах та в напівметалах таких, як Ві.

- По-четверте, тонкий зразок (нанометрових товщин) повинен бути однорідним із розкидом товщин меншим довжини хвилі де Бройля.

За цих умов КРЕ буде мати такі прояви:

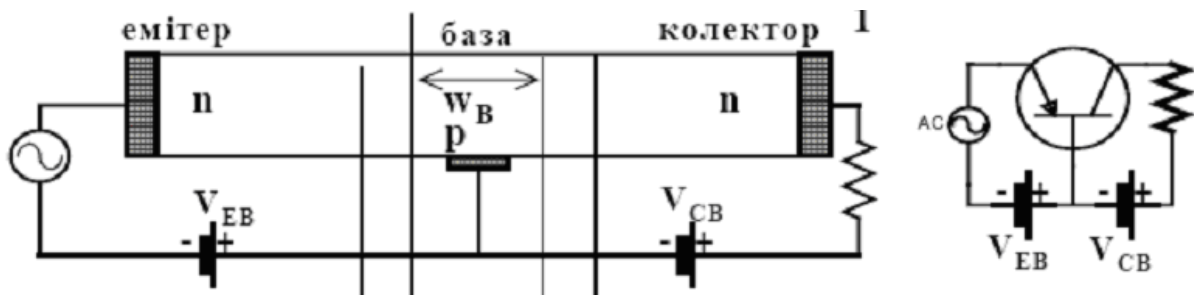
- зміну в енергетичному спектрі носіїв заряду, що може спричинити появу напівпровідникових властивостей у деяких напівметалах та викликати зміну ефективної маси носіїв заряду;
- зміну густини електронних станів та її залежність від енергії; в двовимірному випадку вона перестає залежати від енергії носіїв і починає залежати від товщини зразка  $d$ ;
- зміну концентрації носіїв заряду  $n(d)$ ;
- появу залежності часу релаксації носіїв заряду  $\tau$  від  $d$ .
- зміну глибини екранування електричного поля  $L_e(d)$ .

## 9. Активні елементи у мікроелектроніці. Перспективи розвитку.

В напівпровідникових ІМС використовуються такі активні елементи:

- біполярні  $n^+p-n$  транзистори,
- швидкодіючі транзистори з бар'єром Шоттки,
- багатоемітерні транзистори,
- уніполярні транзистори на основі МДН або МОН структур.

**Біполярні транзистори** були винайдені американськими вченими Джоном Бардінім та Уолтером Бреттейном у 1948 році. Вони складаються із двох включених назустріч один одному взаємодіючих  $n-p$  переходів. Його середня частина шириною  $W_B$ , що утворюється між двома  $n-p$  переходами називається базою. У транзисторів  $n-p-n$  базою є тонкий шар напівпровідника  $p$ -типу, а для транзисторів  $p-n-p$  – шар  $n$ -типу. Взаємодія між  $p-n$  переходами транзистора забезпечується тим, що ширина бази є меншою дифузійної довжини неосновних носіїв заряду у базі. За цих обставин неосновні носії струму (електрони у  $n^+p-n$  транзисторах) при напругах прямого зміщення



одного з переходів інжектують у базу, дифундують крізь базу до другого зворотно зміщеного переходу й витягуються (екстрагуються) у цей перехід. Перехід, призначений для інжекції неосновних носіїв у базу, називається *емітером*, а перехід, призначений для екстракції неосновних носіїв із бази, називається *колектором*. У принципі колекторний та емітерний переходи поводяться однаково, й при зворотному (інверсному) включенні можуть поміняти ролями. Таким чином, принцип дії біполярних транзисторів заснований на керуванні транспортом неосновних носіїв заряду у базі, яка резистивно зв'язана з активною частиною транзистора. При цьому використовуються такі явища:

- *інжекція неосновних носіїв* крізь прямо зміщений емітерний  $p-n$  перехід у середню базову область транзистора,
- *транспорт неосновних носіїв у базі* (дифузія в однорідно легованій та дрейф у не однорідно легованій базі, оскільки в ній виникає електричне поле),
- *витягування (екстракція) носіїв* із бази в колектор електричним полем зворотно зміщеного  $n-p$  колекторного перехід.

**Транзистори інших типів:**

- транзистори з використанням гетеропереходів, наприклад, з емітерним переходом, створеним широкозонним напівпровідником  $n$ -типу в якості емітера та вузькозонним  $p$ -типу для бази,
- транзистори з перенесенням гарячих електронів крізь базу,
- тунельно-резонансні структури,
- одноелектронні транзистори.

Використання напівпровідникових сполук, наприклад,  $A^{III}B^V$ , сплавів GeSi та новітніх технологій виготовлення напівпровідникових структур дозволяє створювати такі пристрої. Транзистори з емітерними гетеропереходами мають більші значення ефективності емісії (більші коефіцієнти інжекції). Інші транзистори дозволяють реалізувати більші рухливості неосновних носіїв у базі, а також зменшити її розміри, що зменшує час прольоту носіїв й збільшує граничні частоти. У транзисторах малих розмірів використовуються особливості розмірного квантування, резонансне тунелювання, одноелектронні явища

**Транзистор із бар'єром Шотткі** - різновид  $n+p-n$  транзистора

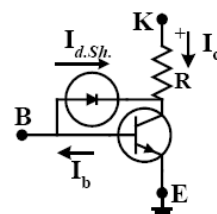
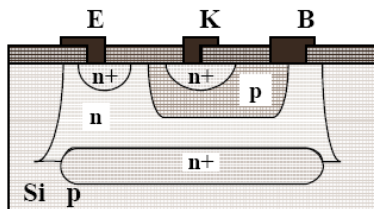


Рис.12.18. Поперечний переріз і схема транзистора з бар'єром Шотткі.

відрізняється від планарно-дифузійного  $n+p-n$  транзистора тим, що металевий контакт бази частково перекриває колекторну область. На границі Si  $n$ -типу із шаром алюмінію утворюється збіднений носіями приповерхневий шар, тобто утворюється бар'єр

Шотткі. Такий транзистор називається біполярним транзистором з бар'єром Шотткі.

**Уніполярні МОН транзистори** є активними елементами ІМС, у яких поперечне електричне поле затвора керує провідністю основних носіїв струму між витоком та стоком. Вони забезпечують підсилення потужності слабких сигналів.

МОН транзистори мають переваги: дуже великий вхідний опір, низький коефіцієнт шуму, використовують при переключенні меншу потужність, займають меншу площу на підкладинці, технологічно більш прості, бо використовують у три рази меншу кількість технологічних операцій при виготовленні по зрівнянні з біполярними транзисторами, дозволяють використовувати короткі та вузькі канали нанометрових розмірів, тобто дозволяють конструювати прилади наноелектроніки, технологічно сумісні з біполярними транзисторами, що дозволяє, коли виникає необхідність використовувати більші коефіцієнти підсилення, створювати ІМС, до складу яких входять як МОН транзистори, так і біполярні транзистори.

Все це обумовлює широке практичне використання МОН транзисторів у цифрових ІМС, особливо у великих ІМС з пристроями пам'яті.

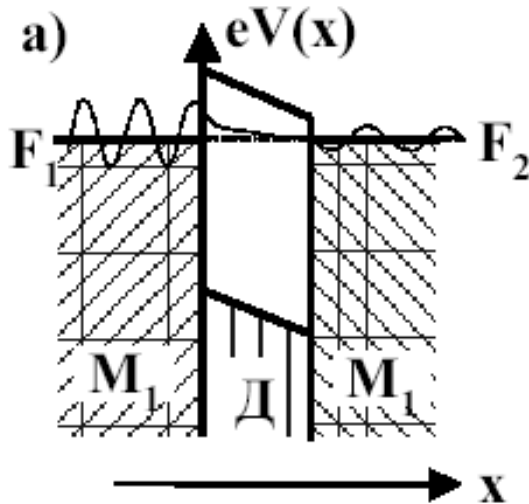
*Функціональна електроніка* використовує *функціональну інтеграцію*, яка дозволяє більш повно використати об'єм речовини. Вона полягає в тому, що одна і та ж сама ділянка кристала використовується для виконання декількох

функцій. Використання динамічних неоднорідностей сумісно зі статичними неоднорідностями розширює діапазон можливостей електроніки. *Наноелектроніка* є наступним етапом у розв'язку проблем, що виникли в процесі розвитку мікроелектроніки. Вона стимулює дослідження низьковимірних структур, особливостей квантово-розмірних та одноелектронних явищ у низькорозмірних структурах, які обмежують працездатність класичних мікроелектронних приладів. Виник також новий технологічний напрямок – нанотехнологія, котра намагається оволодіти новими методами створення структур нанометрових розмірів.



## 10. Тунельні явища в мікроелектроніці. Тунельна мікроскопія.

В сандвічі з товщиною діелектрика меншою довжини хвилі де Бройля збільшується ймовірність тунелювання носіїв струму.



На рис. Зображена енергетична діаграма МДН-сандвіча без напруги від зовнішнього джерела. Густина стаціонарного струму:

$$j = e \int_0^{\infty} T(E_x) \mathfrak{N}(E_x - F) - \mathfrak{N}(E_x - F + eV) \bar{d}E_x, \quad \text{де } \mathfrak{N}(E_x) - \text{потік}$$

електронів, котрі падають на  $1\text{см}^2$  границі метала за  $1\text{с}$  з енергією в інтервалі  $E_x$  до  $E_x + dE_x$ ;  $T(E_x)$  - коефіцієнт прозорості бар'єра для електрона, що має складову квазіімпульсу  $p_x$ ;  $F$  - енергія Фермі. Звідси видно, що густина тунельного струму визначається, головним чином, коефіцієнтом прозорості  $T(E_x)$ . Тунелювання не потребує витрат енергії для просочування електронів крізь потенціальний бар'єр, тому не відбувається зміни температури емітера, тобто при тунелюванні відсутній калоричний ефект. При малих напругах *густина тунельного струму лінійно залежить від*

*прикладеної напруги*, що дозволяє ввести поняття про повну тунельну електропровідність  $\sigma_T = dj/dV$ . Існують 2 характерні риси для тунельного струму крізь МДН-сандвіч:

1)  $\lg j \approx E^{-1}$  та 2) наявність тунельного струму навіть при  $T=0$ .

У тунельних  $p-n$  діодах із сильно легованими  $p$ - та  $n$ - областями, коли концентрація домішок становить  $10^{18}-10^{19}\text{см}^{-3}$ , створюється дуже вузький  $p-n$  перехід протяжністю  $10\text{нм}$ . У ньому навіть при помірних напругах утворюються великі електричні поля з  $E \sim 10^6\text{В/см}$ , при яких виникають сприятливі умови для міжзонного тунелювання.

За допомогою міжзонного тунелювання вдається отримувати спадаючу вольт-амперну характеристику тунельного діода з  $p-n$  переходом, котрий знайшов практичне застосування в спеціальних СВЧ приладах із низьким рівнем потужності, а саме: для гетеродинів, схем синхронізації частоти тощо. Граничні частоти визначаються середнім часом тунелювання та паразитними

параметрами еквівалентних схем, в якій використовуються тунельні діоди, і можуть бути досить великими – більшими за  $T\Gamma\zeta$  ( $1 T\Gamma\zeta = 1012 \Gamma\zeta$ ).

У тунелюванні можуть брати участь енергетичні рівні домішкових або адсорбованих на поверхнях переходів атомів (молекул), поверхневі рівні, енергетичні рівні підзон у випадку розмірного квантування тощо.

Збільшення коефіцієнта прозорості при проходженні електронами певних енергій ( $E = E_i$ ) квантової двохбар'єрної структури, коли електрон ніби "не помічає" потенціальних бар'єрів, тобто проходить без відбивання від бар'єрів, називається *резонансним тунелюванням*. Резонансне тунелювання використовують при розробці нових різновидів польових транзисторів. Для цього в області каналу провідності локально створюють потенціальні бар'єри малих розмірів. В цих ділянках каналу дуже малих розмірів виникають розмірні підзони.

**Тунельна спектроскопія** дозволяє досліджувати різноманітні особливості енергетичного спектра твердих тіл у приповерхневій області. Вона досить широко застосовується й швидко розвивається для досліджень приповерхні твердих тіл.

Тунельний струм залежить від багатьох чинників:

- прозорості потенціального бар'єра  $T$ ;
- густини початкових станів в емітері, зайнятих частинками, що тунелюють;
- густини не зайнятих електронами кінцевих станів в колекторі.

Крім того, тунельний струм залежить:

- від енергетичної структури та природи домішкових центрів діелектрика (напівпровідника), котрий розділяє емітер від колектора;
- від імовірності непружних процесів, пов'язаних із збудженням фононів, плазмонів, поверхневих та об'ємних станів тощо під час тунелювання. Непружні процеси розсіяння впливають на енергетичний розподіл електронів та ймовірність тунелювання. Зокрема, коли електрони на деякий час можуть бути захоплені домішковими станами, прозорість бар'єру або матричний елемент переходу може суттєво змінитися й навіть мати місце новий резонансний різновид тунелювання.

Ці чинники впливають на вольт-амперні криві тунельного струму і використовуються в тунельній спектроскопії.

Поєднання тунельної мікроскопії з тунельною скануючою мікроскопією (СТМ) дає унікальні можливості досліджувати енергетичні особливості електронних станів в окремих місцях поверхні з атомною роздільною здатністю. Потрібно лише враховувати, що ці дослідження проводяться у великих локальних електричних полях, необхідних для тунелювання, котрі іноді можуть змінювати стан речовини.

При СТМ відбувається певна модуляція яскравості на екрані 0,2-0,3 нм. Розмір растру становить кілька мікрометрів. У якості лінійки використовують стабільну кристалічну структуру, що залежить від зовнішніх умов – графіт (періодичний кристал) з добре визначеними довжинами зв'язку між атомами.

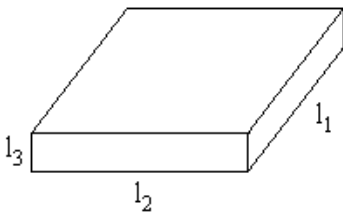
## 11. Фізичні, технологічні, групові обмеження рівня мікромініатюризації.

Причини, які обмежують мінімальний розмір елементів ІМС:

1. Технологічні обмеження мінімального розміру елементів ІМС викликані такими чинниками:

- дифракційні явища, сферична аберація та розсіяння квантів світла та частинок, які використовуються при виготовленні елементів ІМС певної форми методами літографії (чим більше літографічних операцій, тим більша похибка суміщень);
- розмиття краю елементів ІМС, що викликається флуктуаціями в технологічному процесі створення ІМС;
- флуктуація концентрації домішок;
- дифузія (елементи, які складають ІС, повинні мати якомога менший коефіцієнт дифузії).

2. Фізичні причини обмеження пов'язані з:



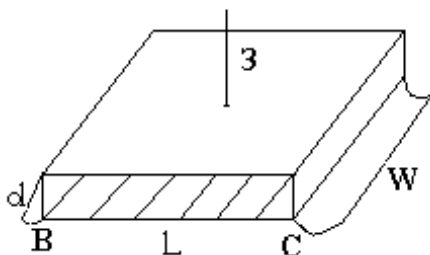
- взаємодією елементів між собою. Це такі процеси, як: їх розігрів, розігрів між елементних з'єднань, паразитні зв'язки.

- розмірними ефектами (зменшення геометричних розмірів елементів в  $K$  разів змінює їх робочі характеристики, функція  $F(K)$ -наз. *скейлінговими коефіцієнтами*). Наприклад, для планарного провідника: опір

$$R = \rho \frac{l_1}{l_2 l_3}, \text{ якщо зменшити розміри } l_1' = \frac{l_1}{k}, l_2' = \frac{l_2}{k}, l_3' = \frac{l_3}{k}, \text{ то}$$

$$R' = Rk \text{ при } \rho = \text{const.}$$

Наприклад, для *МОП-транзистора*: ( $d$  - товщина шару діелектрика,  $L$  - довжина каналу) напруга падіння затвор-витік:



$U_{зв}' = U_{зв}/K$ , густина струму  $j' = jk$  - це погано (при  $j' \leq 10^6 \frac{A}{cm^2}$  обмеження, бо буде руйнування).

3. Обмеження, пов'язані з розмірними ефектами, такими як: класичний розмірний ефект (розмір зразка спів розмірний з довжиною вільного пробігу носія заряду), квантовий розмірний ефект (розмір зразка менший за довжини хвилі де Бройля), тунелювання (коли діелектрик вже не діелектрик), надпровідність (магнітне поле проникає тільки на певну глибину, коли ширина надпровідника спів розмірна з глибиною).

Обмеження функціонування схеми в цілому пов'язані з енергією, що виділяється при функціонуванні схеми в обмеженому об'ємі. Потужність, що виділяється  $P = n f \varepsilon 10^{-3}$ , де  $n$  – кількість активних елементів на чіпі,  $f$  – частота перемикавання,  $\varepsilon$  - енергія, що виділяється на 1 транзисторі. Таким чином  $P=10\text{Вт}$  – проблема з тепловідводом.

## 12. Плівкова електроніка. Конструкція плівкових елементів.

ІМС(інтегральні мікросхеми), всі елементи яких виготовлені у вигляді розташованих на плоскій підкладинці двовимірних плівок, називаються **плівковими інтегральними мікросхемами, а галузь, у якій вивчаються, виготовляються та використовуються плівкові мікросхеми, називається плівковою мікроелектронікою**. Розрізняють *тонкоплівкові й товстоплівкові* ІМС. До першого класу умовно відносять ІМС із товщинами плівок меншими 1мкм, а до другого класу - із товщинами більшими 1мкм.

В залежності від того, який активний елемент використовується в плівкових ІМС, розрізняють такі різновиди плівкової електроніки:

- плівкова напівпровідникова електроніка, котра використовує здебільшого плівкові МДН транзистори;
- плівкова кріогенна електроніка, яка використовує кріотрони та джозефсонівські контакти;
- плівкова магнітоелектроніка, в якій використовуються магнітні властивості тонких феромагнітних плівок;
- плівкова діелектроніка, в якій використовуються властивості нелінійних діелектриків та особливості переносу носіїв струму в тонких діелектричних плівках.

Плівкові ІМС мають такі *позитивні якості*:

- дискретний характер плівкових елементів дозволяє використовувати для їх розрахунку методи, котрі застосовуються для аналізу електричних мереж із зосередженими параметрами, коли перехресні електричні впливи (наведення або втрати) зведені до мінімуму;
- існує можливість мінімізації кількості з'єднань схем за рахунок вільного вибору оптимальних умов монтажу;
- має місце свобода вибору розташування елементів для досягнення мінімального теплового перегріву, тобто напівпровідникові елементи можна розташовувати в таких місцях ІМС, котрі незайняті резисторами, в яких виділяється значна потужність при проходженні крізь них струму.

Плівки виготовляють різними способами, а саме:

- конденсацією парів на підкладинці;
- реактивним вакуумним напиленням, коли при конденсації додаються домішки реактивних компонентів при парціальних тисках менших тиску основного компонента;
- реактивним і не реактивним катодним розпорощуванням;
- іонно-плазмовим напиленням, в якому матеріал, що має осаджуватися, бомбардується іонами плазми газового розряду,
- магнетронним розпорощуванням, в якому плазма аномального тліючого газового розряду робочого газу, наприклад, аргону, локалізується за допомогою електричних і магнітних полів біля мішені, що має розпорощуватися,
- електролітичним осадженням ,
- хімічним осадженням,

- термічним розкладом сполук,
- розбризкуванням тощо.

Плівкові ІМС виготовляють на плоских підкладках із таких *елементів*:

- тонкоплівкових провідників,
- резисторів,
- ємностей,
- активних елементів.

Індуктивні елементи використовують у плівковій електроніці лише в спеціальних схемах.

Підкладки плівкових ІМС виконують три функції:

1. служать основою, на поверхні якої формуються за заданим топологічним рисунком плівкові елементи ІМС;
2. ізолюють окремі елементи один від одного;
3. служать несучим елементом конструкції, котра забезпечує практичне використання ІМС у корпусному або безкорпусному варіантах, і являються теплопровідними елементами ІМС для відводу тепла, що виділяється при їх роботі.

Тонкоплівкові провідники призначені для здійснення гальванічного зв'язку між окремими елементами ІМС. До них пред'являються такі вимоги:

- значна електропровідність ( $\sigma = \rho^{-1} > 10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ );
- значна адгезія до поверхні підкладки і здатність до зварювання або паяння з металевими виводами;
- хімічна інертність до інших речовин, котрі використовуються в ІМС.

Мінімальна ширина смужок в ІМС залежить від граничної роздільної здатності літографії. Для зменшення розкиду номіналів їх розмірів, відношення товщини до ширини вибирається здебільшого  $d/w \sim 0,1$ . Відстань між сусідніми смужками використовується не меншою 1,5 мкм для того, щоб зменшити паразитну ємність, що виникає між ними. У складних ІМС використовується також багаторівнева розводка, яка здійснюється на різних "поверхнях" схеми, котрі ізолюються один від іншого шарами діелектрику.

*Плівкова електроніка знайшла широке практичне застосування для виготовлення в основному пасивних елементів напівпровідникових ІМС, гібридних та суміщених твердотільних напівпровідникових ІМС, магнітних або надпровідних елементів.* Основною причиною, чому до цього часу плівкова мікроелектроніка менш широко використовується для виготовлення активних напівпровідникових елементів полягає в тому, що технологія виготовлення плівок ще не зовсім досконала. У плівках виникає значно більша концентрація дефектів та домішок по зрівнянню з тим, що має місце у твердих тілах. Дефектність плівок призводить до розсіяння носіїв струму, зменшення їх рухливості й погіршення параметрів активних елементів, виготовлених за допомогою плівкової технології. Тому в багатьох країнах досить інтенсивно досліджуються особливості явищ, що відбуваються в плівках, структура плівок, інтенсивно вдосконалюється технологія виготовлення плівкових елементів і систем із них.

### **13. Інтегральні напівпровідникові мікросхеми, їх класифікація, основні елементи та структури.**

Інтегральна мікросхема (ІМС) є цілісним завершеним радіоелектронним пристроєм з високою щільністю ( $10^5$  елементів на 1 кристалі) сполучених і невіддільних один від одного елементів, призначених для виконання певної функції перетворення та обробки сигналів. Окремі елементи, що входять до складу принципової схеми ІМС - транзистори, діоди, резистори, ємності, з'єднувальні провідники - всі вони створюються водночас у єдиному технологічному процесі. Відповідно, ці елементи не можуть бути вилучені з інтегральної мікросхеми шляхом її розбирання на окремі деталі. До складу ІМС входять елементи та компоненти, вони створюються за допомогою групової технології виготовлення ІМС. Розмір елементів, що входять до складу подібних ІМС менші від 1 мкм і досягли вже 0,2 - 0,3 мкм.

Основною особливістю ІМС є те, що їхні елементи виготовляються в об'ємі та на поверхні н/п підкладинки або в н/п шарі, розташованому на діелектричній підкладинці. Конструктивною ознакою ІМС є те, що її елементи, створені в н/п матеріалі або розташовані на ньому, електрично з'єднанні й розміщені в єдиному корпусі, є неподільною системою. За функціональними ознаками ІМС є мультівібраторами, тригерами, логічними елементами, підсилювачами, дешифраторами, змішувачами тощо. ІМС характеризуються *ступенем інтеграції* – логарифм кількості елементів на кристалі (чіпі) ІМС.

ІМС мають такі позитивні якості:

- високу ступінь інтеграції ( $10^5$ );
- широкий діапазон функціональних можливостей;
- подібність технологічних засобів виготовлення дискретних та інтегральних елементів;

Недоліки:

- залежність параметрів ІМС від температури, проникаючих частинок та випромінювання;
- наявність в об'ємі н/п паразитних гальванічних зв'язків.

#### ***Класифікація ІМС:***

1. За конструктивними ознаками:

- схеми з активною підкладинкою (ІМС на кремнієвій підкладинці);
- схеми з пасивною підкладинкою (ІМС на діелектричних підкладинках із сапфіру або ситилату); корпусні ІМС; без корпусні ІМС.

2. За технологічними ознаками:

- планарно-дифузійні (виготовляються за допомогою локального легування н/п донорами чи акцепторами);
- сумісні або поєднані (використовуються н/п елементи і плівкові пасивні елементи на поверхні підкладинки);
- на МДН-структурах (активними елементами служать уніполярні МОН-транзистори);

- багатокристалльні (складаються з декількох ІМС на окремих кристалах, які монтуються в одному корпусі і з'єднуються між собою зовнішніми дротяними з'єднаннями).
3. За ступенем інтеграції:
    - 1-ша ступінь ІМС-1 (10 елементів/кристали);
    - 2-га ступінь ІМС-2 (10-100 ел/крист);
    - 3-тя ступінь ІМС-3, великі ІМС (ВІМС) (1000 ел/крист);
    - 4-та ступінь ІМС-4, над великі ІМС (НІМС) ( $10^4$  ел/крист);
    - 5-та ступінь ІМС-5 (більше  $10^4$  ел/крист).
  4. За фізичними принципами роботи:
    - схеми на біполярних транзисторах, в яких використовуються рух неосновних носіїв заряду;
    - схеми на уніполярних транзисторах, в яких використовується рух основних носіїв заряду.
  5. За швидкодією:
    - звичайні ІМС, які працюють на частотах до 3 ГГц;
    - НВЧ ІМС, як працюють при частотах більше 3 ГГц (використовують в них мікросмужкові лінії передач).
  6. За функціональними ознаками:
    - генератори;
    - детектори;
    - комутатори;
    - логічні елементи;
    - багатофункціональні;
    - модулятори;
    - перетворювачі;
    - схеми затримки;
    - тригери; підсилювачі; фільтри; елементи пам'яті тощо.

**Підкладинка ІМС** є основою, на поверхні якої або в їх приповерхневому шарі формуються елементи ІМС. Вони, як уже вказувалось у главі 11, поділяються на *пасивні й активні*.

*Пасивні підкладинки* здебільшого виготовляються зі скла, сапфіру, ситалу, шару SiO<sub>2</sub> на Si у випадку (SOI) або інших діелектриків у технології КНІ й виконують дві функції: служать основою для формування на ній ІМС та створення ізолюючих проміжків між окремими її елементами. До пасивних підкладинок висувають ті ж самі вимоги, що і до підкладинок плівкових ІМС, а саме: відсутність шорсткості ( $< 25$  нм), плоскопаралельність (вигини менші за довжину хвилі випромінювання, що використовується при фотолітографії), великий об'ємний та поверхневий питомі опори ( $> 10^{14}$  Ом·см), електрична міцність  $E > 40$  кВ·мм<sup>-1</sup>, велика теплопровідність ( $> 2 \cdot 10^{-3}$  кал·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>·град<sup>-1</sup>), хімічна інертність, механічна міцність, робочі температури без деформацій під дією власної ваги на рівні 4000 С, можливість знегажування, низька вартість. *Активні підкладинки* служать напівпровідниковим матеріалом для формування ІМС у їх приповерхневих шарах. Здебільшого активні підкладинки виготовляють із кремнію.



Підкладинки шліфуються, механічно й хімічно поліруються. Нерівності їх поверхні повинні бути меншими 0,1 мкм. Потім вони промиваються, очищуються ультразвуком в активних рідинах, травляться іонним бомбардуванням і знегажуються у вакуумі. Лише після такої складної обробки підкладинки використовуються для створення ній ІМС.

#### **АКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ІМС:**

1. біполярні n+-p-n транзистори,
2. швидкодіючі транзистори з бар'єром Шоттки,
3. багатомітерні транзистори,
4. уніполярні транзистори на основі МДН або МОН структур.

**ДЮДИ** в ІМС зазвичай формують із транзисторних структур.

#### **ПАСИВНІ ЕЛЕМЕНТИ**

В ІМС пасивні елементи виготовляються в приповерхневому шарі активної підкладинки або в об'єднаних (сумісних) ІМС за плівковою технологією. Здебільшого використовують дифузійні або об'ємні резистори й об'ємні і тонкоплівкові конденсатори. Індуктивності, як правило, в ІМС не використовуються або використовуються n-p-n транзистори в особливому режимі роботи, коли їх імпеданс має індуктивний характер, або використовуються плівкові "катушки" індуктивності, які здебільшого мають вигляд металевих спіралей

#### **14. Функціональна мікроелектроніка, основні явища, які використовуються в ФЕ.**

Галузь електроніки, в якій носієм інформації служить певний сигнал, параметрами якого управляють динамічні неоднорідності середовища, які виникають під дією певного управляючого сигналу. Особливістю елементів ФЕ є використання середовищ з розподіленими параметрами. В цих середовищах не можливо виділити області, які виконують окремі схемотехнічні функції, бо вся система з динамічними неоднорідностями впливає на багатовимірну функцію вхідного сигналу і перетворює його у вихідний сигнал. Тому функціональна інтеграція має переваги:

- велику продуктивність,
- великі функціональні можливості пристроїв, що еквівалентно
- суттєвому збільшенню інтеграції по відношенню до звичайних ІМС.

ФЕ використовує особливості хвильових процесів і розподіленої взаємодії е/м полів з електронами, атомами і молекулами конденсованих середовищ різної природи: металів, н/п, магнітодіелектриків, п'єзоелектриків, сегнетоелектриків, та гомо- і гетероструктури цих матеріалів.

В ФЕ використовують такі фізичні явища:

- скінченні значення швидкостей дрейфу основних носіїв струму,
- зсув зарядів в зв'язаних системах областей просторових зарядів в н/п,
- електричні неоднорідності (домени сильного поля),
- плазмові явища в твердих тілах (лавиноподібний пробій, плазмові коливання),
- взаємодію е/м хвиль і електронів з фононами,
- взаємодію е/м хвиль з магнітними неоднорідностями, наприклад, спіновими хвилями,
- електро- і п'єзострикційні явища,
- взаємодія когерентних і некогерентних е/м хвиль оптичного діапазону з статичними і динамічними неоднорідностями середовища,
- взаємодію сигналів з молекулами органічних сполук в тому числі і білкових молекул.