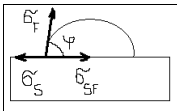
V. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ

Телятников, Брыгидыр, Билоненко



між коефіцієнтами поверхневого натягу (КПН) між підкладинкою і вакуумом σ_S , між плівкою і вакуумом σ_F , та між підкладинкою та плівкою σ_{SF} . КПН дорівнює вільній енергії одиниці поверхні. Відповідно ці коефіцієнти визначають сили пов. натягу, що діють на одиницю елементу довжини границі розділу: $dF = \sigma \cdot d\ell$. З умови рівноваги для будь-якого елементу довжини лінії доторкання підкладинки, 3-вимірного острівка плівки і вакуума $\sigma_S = \sigma_{SF} + \sigma_F \cos(\varphi)$. Якщо кут φ дорівнює 0, то острівок розтікається тонким шаром по поверні підкладинки, що відповідає пошаровому механізму росту. Це приводить до такої умови $\sigma_S \geq \sigma_{SF} + \sigma_F$. Якщо $\varphi > 0$, то має місце острівковий механізм і $\sigma_S < \sigma_{SF} + \sigma_F$.

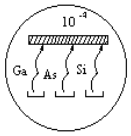
4)Атоми речовини розташовуються на поверхні відповідно розподілу Пуасона так, ніби їх кидали випадково і вони просто прилипали б на місці.

5b.1 МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ І СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛІВОК. ТЕРМОДИНАМІКА ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ ЗАРОДКІВ КОНДЕНСОВАНОЇ ФАЗИ І КРИСТАЛІЗАЦІЯ. (ANCHOR)

Процес росту шару можна розділити на кілька етапів: 1)адсорбція атомів і молекул на розігрітій підкладинці; 2)десорбція; 3)взаємодифузія; 4)вбудовування атомів у найбільш енергетично вигідні місця в гратці; 5)зародкоутворення. Кодна ділянка поверхні має індивідуальну хімічну активність. Конденсація на підкладинку нового матеріалу із газової фази визначається швидкістю зіткнення атомів чи молекул з підкладинкою – кількість частинок, що попадають за одиницю часу на одиницю поверхні -

$r = p/\sqrt{2\pi MkT}$, де p – тиск пари. Частинка, конденсована на поверхні, може одразу лишити поверхню підкладинки або дифундувати по неї. Кожний з індивідуальних атомних процесів характеризується енергією активації і можуть бути описані у першому наближенні експоненціальним законом. Розрізняють три основних типи росту плівок: 1)пошаровий (мех. Франка-ван-дер-Мерве); 2)острівковий (мех. Вольмера-Вебера); 3)ріст шару з острівками (ріст Странскі-Крастанова); 4)статистичне осадження.

1)При пошаровому механізмі кожний наступний шар плівки починає формуватись тільки після завершення росту попереднього. Має місце, коли взаємодія між підкладинкою та шаром атомів значно більше, ніж між найближчими атомами в шарі. 2)Має місце, коли взаємодія між найближчими атомами шару значно більше, ніж між атомами та підкладинкою. Тут речовина з самого початку сідає на поверхні у вигляді багатошарових зародків. 3)Перший шар повністю покиває підкладинку, а на ньому відбувається ріст 3-вимірних зародків. Сприяє велика невідповідність між параметрами кристалічної гратки плівки та підкладинки. Умова, що визначає реалізацію того чи іншого механізму росту, можна отримати з аналізу співвідношення



2) Молекулярно—променева епітаксія. Самий безпечний і точний метод зусіх інших. Використовується для дуже тонких (декілька нанометрів) плівок. Основні переваги: - низька температура процесу (600-800 С температура підкладенки). Основана на такому принципі – компоненти в ріжних посудинах випаровуються, через заслонки газові пучки фокусуються та направляються на підладку, на якій вони осідають, та реагують. Величини потоків також керуються температурою при якій йде випаровування. Проблема створення такої системи .

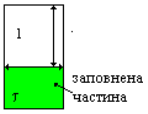
1)Вакуумні умови: щоб створити достатню довжину вільного пробігу для парів (1Е-7 Па)

2)Формування фокусованого променя.Є циліндр: Чим більшим буде співвідношення $\frac{\ell}{r}$, більш вузьким буде сформований потік (атомний потік).

3)Рідкофазна епітаксія.

Ga, Sn, Sh, Pt -для росту сполук A_3B_5 (буферні матеріали, або розчинники).

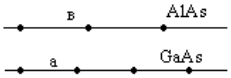
Температура розчинника підбирається так, щоб вона була менша за температуру плавлення А і В. Метод рідкофазної епітаксії використовують для створення варізонних структур.



5.b.2 Епітаксійне нарощування плівок

Епітаксією називають процес нарощування монокристалічних шарів на підкладену, при якому в кристалографічна орієнтація шару, що нарощується повторює кристалографічну орієнтацію підкладенки.

Використовується для отримання робочих тонких шарів однорідного напівпровідника. Як правило матеріали плівки і підкладинки однакові, та можуть бути і ріжними (1. на підкладці певного матеріалу росте плівка цього ж самого матеріалу -**гомоепітаксія**. 2.Коли на підкладці матеріалу першого виду росте матеріал іншого виду-**гетероепітаксія**) – наприклад кремнієва плівка на сапфировій підкладці. Можливість нарощування плівки з іншого матеріалу залежить від того, наскільки близькі ці матеріали за кристалічною



структурою. Необхідно, щоб $\frac{b-a}{a} \approx 1\%$,Епітаксіна плівка створюється одночасно на всій поверхні підкладинки і одночасно в неї вводяться домішки , розподілені рівномірно по всьому об'єму плівки. таким чином створюють всякі p-n переходи (шляхом декількох послідовних епітаксій).

Існує три базові методи епітаксії :

1) Осадження з парової фази (метод газофазної епітаксії) (Різновид: **епітаксія з металоорганічних** сполук).

При епітаксії мають місце 2 основних процеси: **а)** масопереніс в газовому потоці (Водень з домішкою хлориду кремнію, та інших легуючих домішок пропускають через циліндр, який рівномірно нагрівається).**б)** хімічний процес між плівкою що росте і потоком.

Осадження з паров. Фази відбувається в кварцовом реакторі.Крізь циліндр пропускають суміш $SiCl_4$ і H_2 : $SiCl_4 + H_2 \rightarrow Si_{тв} + HCl$ Щоб плівка рівномірно росла по поверхні; треба, щоб:потік був ламінарний: $Re = \frac{DV\rho}{\mu} < 2000$ де D -діаметр труби, V-швидкість газу, ρ -густина, μ -в"язкість.2)Число Рейнольдса Re було сталим (щоб V=const).Іде 2 процеси: утворення Si (тв.) і стравлення Si кислотою HCl .Реальні реактори працюють в співвідношенні $\frac{Cl}{H} = 0{,}01$. Пластини в середині циліндру розміщуються на графітовому тримачі, і на них теж з великою точністю підтримується рівномірна висока (1200 С) температура.

Недолік – через високу температуру домішки дифундують в підкладку, та навпаки, через це неможливо створити плівку тонше 0.5 мкм

Різновид газофазні епітаксії –газофазна епітксія при зниженні тиску (епітаксія з метаалоорганічних з"єднань)

Катодний метод напилювання:

суть метода полягає в тому, що в атмосфері якогось нейтрального газу (наприклад Аргону) 10^{-1}-10^{-2} мм.рт.ст. запалюють (2-3 кВ) аномальний тлючий розряд. Анод – підкладка. Катод – матеріал який напилюють (відповідно він має бути провідником). В результаті іони Аргону отримують достатню енергію для того щоб вибивати нейтральні атоми з поверхні катоду які в свою чергу дрейфують до аноду (підкладки) (анод знизу, катод зверху). Особливістю даного процесу є те, що він проходить при низькій температурі (на відміну від вакуумного напилювання) і таким чином можна напилювати тугоплавкі матеріали.

Іоно - плазмове напилювання:

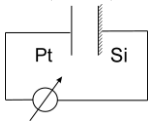
по суті модернізований катодний метод відрізняється лише тим що там є ще одна пара анод-катод між якими є постійний розряд (плазма) а на нашу пару катод-анод подається напруга лише для напилювання а не для створення та розгонки іонів Аргону (які і відривають атоми від катоду).

Методи контролю складу плівок(чистота поверхні):

Електронний метод

1)Електронна спектроскопія.

2)Фотоелектронна спектроскопія.



Недолік – дорого.

Метод Кельвіна (оснований на фіксації зміни ємності конденсатора, утв., в якості одного електр. плівкою при зміні складу)

$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ $\tilde{d}$ -> $\tilde{C}$ -> $\tilde{Q}$ α

Наслідок – потрібно, щоб пластина багато рухалась для обстеження усієї поверхні.

Трибонометричний метод – контроль йде по коефіцієнту. терня спокою. Чим він менше – тим більше домішок.

Оптичний метод – використовує лазери з поляризованим світлом. Оснований на формулах Френеля.

Метод контролю по крайовому куту змочення SiO_2 | H_2O

$5 - 7^{0}$ -> SiO_2 тер. $30 - 36^{0}$

кут змочення

5.3 Методи виготовлення тонких плівок. Методи визначення структури та складу тонких плівок.

До основних методів нарощування тонкої плівки на підкладці відносять:

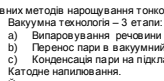
1) Вакуумна технологія – 3 етапи:
   a) Випаровування речовини з метою отримання пари - атомарного потоку.
   b) Перенос пари в вакуумний простір.
   c) Конденсація пари на підкладці.
2) Катодне напилювання.
3) Йоно - плазмове напилювання.
4) Магнетронне розпилення.
5) Епітаксія .

Типи епітаксії: гомоепітаксія (на підклад. певного матеріалу росте цей же матеріал). Та гетероепітаксія (на підладинці 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 ~ 1%



$SiCb_4$(газ) + $2H_2$(газ) $\xrightarrow{t^0}$ Si(тв.) + 4Cl(газ)

Газова епітаксія.

Досягають ламінарного потоку (Re<2000) і вибирають певн. профіль, де концентрація $SiCb_2$ стала

$y = (D_x V/R_e)^{1/2}$, $R_e = (D_x V\rho)/\eta$

Кінетика хім. реакц. зал. від температури.

Рідинна епітаксія.

Використовують. для вирощування GaAs для оптичних приладів, та для вирощування інших матеріалів. A^3B^5. В якості розчинників беруть Ga, In, Sn, Pt.

$\ell_1 = \int_{\varphi_0}^{\pi/2} \lambda n_1 \sin\varphi d\varphi$. Суттєвий внесок у сумарний шлях вносять розсіяні від поверхні плівки електрони

$\ell_2 = \int_0^{\varphi_0} x n_1 \sin\varphi d\varphi$. Маємо середню ефективну довжину вільного пробігу електрона

$\lambda_{еф} = \frac{1}{n_1}\left(\int_0^{\varphi_0} x n_1 \sin\varphi d\varphi + \int_{\varphi_0}^{\pi/2} \lambda n_1 \sin\varphi d\varphi\right)$. Так як $x = d/\cos\varphi$ і $\cos\varphi_0 = d/\lambda$, то інтегруючи $\lambda_{еф} = d\left(1 + \ln\frac{\lambda}{d}\right)$.

Враховуючи, що $\sigma = \frac{1}{2}\frac{q^2 n}{m_n v_n}\lambda = \frac{1}{2}\frac{q^2 n}{m_n v_n} d\left(1 + \ln\frac{\lambda}{d}\right)$.

Іноді зручно користуватися відношенням питомої провідності плівки до питомої провідності масивного зразка

$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \frac{d}{\lambda}\left(1 + \ln\frac{\lambda}{d}\right)$.

(Далі вважаю йде матеріал для "загального розвитку")

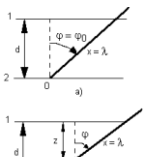
При виведенні цієї залежності вважалось, що електрони розсіюються лише на граничних поверхнях, а їх довжина вільного пробігу являє собою статистично усереднену величину. Якщо додатково врахувати інші механізми розсіяння і розподіл електронів по швидкостям, то отримаємо кінцеву формулу для визначення питомої провідності плівок, товщина яких порівняння з довжиною вільного пробігу електронів $\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \frac{3}{4}\frac{d}{\lambda}\left(\ln\frac{\lambda}{d} + 0{,}4228\right)$. Врахування впливу електричного та магнітного полів на розподіл електронів по швидкостях дає $\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = \frac{3d}{4\lambda}\left(\ln\frac{\lambda}{d} + 0{,}4228\right) + 0{,}4816\left(\frac{d}{\lambda}\right)^2$. При виконанні умови $d/\lambda >> 1$ має місце

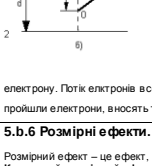
$\frac{\sigma}{\sigma_\infty} = 1 - \frac{3\lambda}{d}$.

5B.5. РОЗМІРНІ ЕФЕКТИ. КЛАСИЧНИЙ РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ. ДОВЖИНА ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ НОСІЇВ СТРУМУ. ВПЛИВ УМОВ РОЗСІЮВАННЯ НОСІЇВ СТРУМУ НА ГРАНИЦЯХ ПЛІВОК НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ.

Тонкі плівки знаходять широке застосування у сучасній мікроелектронніці. Їх особливість у тому, що їх товщина кінцева, яка грає вирішальну роль у багатьох фізичних процесах. Структура плівок також суттєво відрізняється від структур масивних зразків. Коли кажуть про тонкі плівки, то їх товщину порівнюють з якими-небудь фізичними параметрами, наприклад з довжиною вільного пробігу електрону, дебаєвською довжиною екранування, радіусаом кривизни траєкторії електрона.

Наприклад, такий несуттєвий для масивних зразків фактор, як шорсткість поверхні, стає для тонких плівок важливим, оскільки від нього залежить коефіцієнт зеркальності відбиття електронів поверхнею, що суттєво впливає на питому провідність. Розміри структурних дефектів можуть бути порівняні з їх товщиною. У тонких плівках можуть проявлятися ефекти, що відсутні у масивних зразках, наприклад тунелювання електронів в гранулярних плівках.





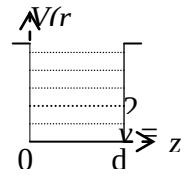
Різні за фізичною природою ефекти, що приводять до зміни властивостей матеріалу тільки у тонких плівках у порівнянні з властивостями цих же матеріалів у вигляді масивних зразків, називають розмірними ефектами. Розглянемо механізм прояву розмірного ефекту, коли товщина плівки порівняння з довжиною вільного пробігу елекрону ($d \leq \lambda$). При цьому електрони дифузно розсіюються на поверхнях 1 та 2, в результаті питомий опір збільшується внаслідок появи додаткового механізму розсіяння. В точці 0 одночасно починають рух n_1 електронів, причому напріми їх руху розподілені рівномірно всередині півсфери. Всі електрони, що вилітають під кутом $\varphi < \varphi_0$, в середньому поширюються на відстань λ , а всі електрони всередині кута $\varphi > \varphi_0$ пролітають відстань $x = \lambda$, оскільки товщина плівки не більша довжини вільного пробігу електрону. Потік елктронів всередині тілесного кута $2\pi \sin\varphi d\varphi$ дорівнює $n_1 \sin\varphi d\varphi$. Основний внесок у шлях, який пройшли електрони, вносять ті електрони, що зізнали зіткнення з поверхнею. Сумарний шлях таких електронів

5.b.6 Розмірні ефекти. Квантовий розмірний ефект. Умови появи ефекту.

Розмірний ефект – це ефект, при якому параметри каналу залежать від його розмірів.

Квантовий розмірний ефект. Він проявляється тоді, коли основні носії струму рухаються в потенціальній ямі між двома поверхнями зразка, розміри якої менші за довжину хвилі Дебройля $(\lambda < d)$. Починає впливати невизначеність квазіімпульсу вздовж вісі, по якій розмір зразка обмежено. Енергетичний спектр квазічастоти починає залежати від форми та розмірів потенціальної ями.

Це приводить до дискретизації спектру рухливості заряду (ефективної маси), а значить і провідності. У ВАХ з"являться сходинки. Поміняється густина енергетичних станів, як наслідок зміниться концентрація носіїв струму.



Відстань між розмірними під-зонами має бути більша за тепловий розкид квазі частоти $\Delta E_{v,v+1} > kT$. При T = 300K, має бути d < 20^5см.

$\Delta E_{v,v+1} >$ за ширину самої під-зони $\Delta E_{v,v+1} > \delta E$.

Концентрація носіїв струму має бути малою, щоб заповнювалась лише перша розмірна під-зона.
Зразок має бути однорідним.
Має такі прояви.
зміна в енергетичному спектрі носіїв струму, що може викликати зміну в еф. масі.
зміна густини електронних станів.

зміна концентрації носіїв струму $n(d)$.

поява залежності $\tau = \tau(d)$.

Експериментальні спостереження.
періодичні зміни товщинної залежності питомого опору.
особливості ВАХ тунельного струму структур з дуже тонким одним з електродів.
особливості спектра поглинання світла в інверсійних каналах.

5.7 Розмірні ефекти в шарах просторового заряду в напівпровідниках. Умови, за яких в каналах провідності має місце велика рухливість носіїв струму.

Класичний розмірний ефект. Розмірний ефект – це ефект, при якому параметри н/п залежать від його розмірів. Нехай довжина вільного пробігу в об'ємі – l_V, а на поверхні – l_S, то ефективна довжина вільного пробігу: $l_{eff}^{-2}=l_V^{-2}+l_S^{-2}$. Якщо ж один з розмірів зразка $d < l_S$, то $l_{eff}^{-2}=l_V^{-2}+d^{-2}$. Тобто, $l_{eff}^{-2}=f(d)$. Тоді провідність: $\sigma = en\mu = en\frac{e}{m^*}(\tau) = en\frac{e}{m^*}\frac{l_{eff}}{v} = f(d)$

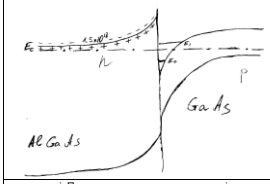
Є два види розмірних ефектів: класичний $\lambda < d < l_{S,V}$ та квантовий $\lambda > d$. λ – довжина хвилі Дебройля. Нехай, маємо плівку товщиною *d*. Якщо $d > l_S$, то: $\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_V} + \frac{1}{\tau_S} = \frac{1}{\tau_V}\left(1+\frac{\tau_V}{\tau_S}\right) = \frac{1}{\tau_V}\left(1+\frac{l}{d}\right)$ тут l – довжина вільного пробігу

рівноважних носіїв струму. Тоді: $\mu_{eff}(d) = \frac{e\tau_{eff}}{m^*} = \frac{e\tau_V}{m^*}\frac{1}{1+l/d} = \mu_V\frac{1}{1+l/d}$ $\sigma_{eff}(d) = en\mu_{eff}(d) = \sigma_V\frac{1}{1+l/d}$

Класичний ефект не спостерігається на досліді, бо завжди існує поверхневий вигін зон, який ускладнює спостереження ефекту.

Квантовий розмірний ефект.
Він проявляється тоді, коли основні носії струму рухаються в потенціальній ямі між двома поверхнями зразка, розміри якої менші за довжину хвилі Дебройля $(\lambda < d)$. Починає впливати невизначеність квазіімпульсу вздовж вісі, по якій розмір зразка обмежено. Енергетичний спектр квазічастоти починає залежати від форми та розмірів потенціальної ями.
Умови появи поверхневого заряду.

Велика рухливість носіїв заряду. $\mu = \frac{e\tau}{m^*}$, тому чим більше τ , тим вища рухливість. Слід робити канали, в яких багато вільних носіїв, та мало центрів розсіювання. Це досягається при модульованому легуванні.



Розглянемо гетеропереход $Al_xGa_{1-x}As$–GaAs, x = 0.35. $Al_xGa_{1-x}As$ – сильно легований. Утворюється вироджений 2Д-газ $(E_0 < E_F)$. Електрони в GaAs прийшли з $Al_xGa_{1-x}As$. В такій гетероструктурі зарядові центри та носії (e) – рознесені (за рахунок крюка). Отже, опір структури – малий, а рухливість – велика. Для збільшення рухливості не роблять легування біля межі.
High Electron Mobility Transistor.
Беруть нелегований GaAs ($n\sim10^{14-15}$ cm^{-3}) – підкладка (100 мкм). Вище – нелегований $Al_xGa_{1-x}As$, ще вище – сильно легований $Al_xGa_{1-x}As$ ($n\sim10^{18}$ cm^{-3}). На межі не легованого $Al_xGa_{1-x}As$ і GaAs виникає 2Д-газ. Згори наносять алюміній – затвор. Для стоку та витоку вводять індій. Працює як польовий транзистор.

поверхні. Проходить у тих же умовах, що і попереднє. Але лицьовою стороною підкладинка повернута від мішені, а в атмосферу інертного газу додається кисень. При цьому пластина під позитивним потенціалом. Заряджені атоми кисню летять на поверхню і влазить у неї. Процес проходить при великій напруженості поля, тому плівки дуже міцні. **Термічне окиснення.** Проходить при температурі 1000-1200^0 С. Може бути сухе та вологе(до кисню додаються пари води). При використанні тонкоплівкових конденсаторів на високих частотах виникають втрати. Цей факт описується так званим тангенсом кута втрат – тангенсом кута між

векторами повного струму та реактивною складовою цього струму при заданій частоті. $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}; C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d}$. Аби мати max.

Ємність, необхідно d ->0. Але може виникнути пробій $d \geq \frac{Uпробою}{Eпробою}$, де $E_{пробою}$ - електрична міцність шару. $E_{пробою}$

починається з 600V/мкм. Кожен діелектрик характеризується своєю діелектричною сталою Для SiO_2

$\varepsilon = 5; E_{пробою} = (2..3) * 10^6 B/cm$ Для Ta_2O_5 $\varepsilon = 20;$ Для товстих плівок із сегнетоелектриків використ. титанат барію

$\varepsilon > 500$.

5.8 Діелектричні плівки Йоно-плазмове напилення.

Запускається розряд, який чекає (пунктир). Анод заземлений. На мішень подають велику від'ємну напругу(2-3kV). Виникає аномальний розряд – вилітають з мішені атоми і летіти на анод. При цьому, якщо зробити заслонку, то можна зробити чистку мішені, просто приклавши негативний потенціал. При потраплянні іонів на мішень-діелектрик там накопичується позитивний заряд. Тому до мішені прикладають змінний потенціал аби на мішень потрапити електрони і зняли його. Але оскільки електрони мають більшу рухливість, то за півперіод прилетить більше електронів ніж за відповідний півперіод іонів. Тому на мішень подають додаткове позитивне зміщення аби період для електронів тривав менше часу. **Анодування.** Процес окиснення металічної

оберну навколо власної вісі. Результуючий магнітний момент атому є векторна сума усіх орбітальних і спінових магнітних моментів. Феромагнетизм у групи залізу (Fe, Ni, Co), виникає внаслідок нескомпенсованості спінових магнітних моментів електронів з ріним спіном.

Плівки можна розглядати як зразки, яким притамання 2-вимірна геометрія, тобто малим відношенням товщини до її лінійних розмірів. При таких розмірах вигідним станом плівки, коли напрямок вектора намагніченості при відсутності магн. поля лежить в її площині. Завдяки цьому для намагнічування плівки в її площині необхідно прикласти значно менше поле, ніж коли плівка намагнічується перпендикулярно до площини плівки. Таким чином специфіка геометрії плівки приводить до анізотропії – плівці притаманна площинна магнітна анізотропія.

Якщо в процесі росту до плівки прикласти магнітне поле, то в ній виникає одновісна магнітна анізотропія. В площині полікристалічної плівки (наприклад яка має форму круглої плями) стає енергетично вигідна орієнтація вектора намагніченості вздовж деякої вісі. Така вісь називається віссю легкого намагнічування (ВЛН). При цьому вектори намагніченості можуть бути орієтовані паралельно ВЛН, утворюючи так звані циліндричні домени. Анізотропія – важливе явище. Плівки з перпендикулярною анізотропією можуть використовуватися у запам'ятовуючих пристроях з вертикальним способом запису. У цьому випадку локальні ділянки плівки перемагнічуються не у її площині, а їй перпендикулярному напрямку. Послідовність таких ділянок на поверхні носія і є записана цифрова інформація.
Розмагнічений стан плівки характеризується хаотичною намагніченістю доменів. При переході від одного домену до іншого відбувається зміна напряму намагніченості. Шар між сусідніми доменами називається доменною стінкою. Внаслідок цього тут спостерігається поворот вектора намагніченості від одного напрямку до іншого,. внаслідок чого на перетині доменної стінки з поверхнею плівки виникають магнітні поля. При зменшенні товщини плівки енергія цих полів збільшується. Тому в тонких плівках існування доменних стінок енергетично невигідне. Неель показав, що в плівках товщиною менше критичної енергетично вигідна доменна стінка, в якій поворот вектора намагніченості при переході від одного домену до іншого відбувається у площині плівки, тобто перпендикулярна складова вектора залишається рівною 0. Така доменна стінка наз. неелевскою. Для товстих плівок стійкою доменною стінкою буде шар товщиною порядку 100нм, а для тонких – 20нм.

5b.9. ФЕРОМАГНІТНІ ПЛІВКИ. ЗАЛЕЖНІСТЬ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІД ТОВЩИНИ. ДОМЕННІ СТІНКИ. АНІЗОТРОПІЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТОНКИХ ПЛІВОК. ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ ТОНКИХ ФЕРОМАГНІТНИХ ПЛІВОК. ШАРИ З ЦИЛІНДРИЧНИМИ ДОМЕНАМИ. ЗАСТОСУВАННЯ ФЕРОМАГНІТНИХ ПЛІВОК.

Вважають, що тонкою магнітною плівкою називається шар феромагнітного матеріалу завтовшки від кількох ангстрем до 10000 ангстрем. На сьогодні існують такі методи отримання тонких плівок: 1)термічне випаровування речовини у вакуумі; 2)катодне розпилення; 3)магнетронне розпилення; 4)іонно-плазменне розпилення; 5)електролітичне осадження; 6) МПЕ.

Різні чинники впливають на магнітні властивості плівок. Особливо важливу роль грає кристалічна гратка. Підкладинки, на яких конденсуються плівки, звичайно мають температуру 100-300°С, що суттєво менше температури кристалізації масивних магнітних сплавів. В результаті плівки формуються в умовах помітного переохолодження. Тому такі плівки мають певну специфічк структуру. Для неїх-ні такі особливості. Вони складаються з кристалів, розміри яких значно менші, ніж у масивних зразків (порядку 10^{-4}м). Охолоджуючи підкладинку до достатньо низької температури, можна отримати плівку в аморфному стані. Також виникають дефекти типу вакансій та міжвузельних атомів. Виникають макро- та мікронапруження та деформації. Рівень напруження іноді більший за поріг міцності у масивних зразках. При нагріванні плівки спостерігається укрупнення кристалів, зменшення мікро та макро напружень, відбуваються фазові переходи, в результаті чого плівки переходять у більш рівноважний стан.

Структура і фізичні властивості плівок також залежать і від товщини самої плівки. При зменшенні товщини плівки зростає внесок поверхневих процесів в порівнянні з об'ємними. В плівках з товщиною меншої деякої критичної в результаті збільшення внеску поверхневої енергії змінюються фазові та структурні стани, ел. опір та інші властивості.

Згідно з моделлю атому Резерфорда-Бора рух електрона можна представити у вигляді круговому струму $I = en$, де e-заряд електрона, n-частота обертів навколо орбіти. Тоді виникає магнітне поле. Орбітальний магнітний момент електрона $p = \mu I S = \mu enS$, де μ -магнітна стала, S-площа контура. Окрім орбітального магнітного моменту, електрон має власний спіновий магнітний момент внаслідок

Основним напрямком мікроелектроніки є збільшення інтеграції, швидкодії та мінітюаризація приладів.
Мінітюаризація переслідується з метою зменшення енергоспоживання, збільшення ступеня інтеграції, виконання приладу в одному технологічному циклі (відповідно здешевлення, та зменшення браку). Також мінітюаризація технології переслідується з метою збільшення швидкодії (зменьшючи розмір ми зменшуємо характерні часи роботи елементів, збільшуємо частоту, швидкодію)

5.b.10 Мікроелектроніка. Основні напрямки розвитку мікроелектроніки. Необхідність мікромініатюризації

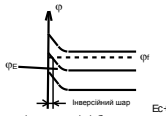
Мікроелектроніка це – розділ електроніки, що включає в себе дослідження, конструювання та виготовлення інтегральних схем та радіотехнічної апаратури на їх основі.
Інтегральна схема – мікроелектронний продукт, що виконує певну функцію перетворень, обробки сигналу накопичення інформації. Має високу густину упаковки електрично з'єднаних елементів. З токи зору застосування розглядається як єдине ціле. ІС розрізняють за кількістю вбудованих .

5.11 Мінімальний розмір елемента: фізичні, технологічні та групові обмеження рівня мікромініатюризації. Скейлінг (масштабування).

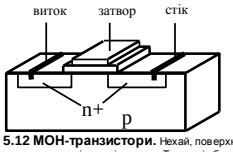
По этому вопросу я нихрена не нашел. Есть только популярныее статьи но вспомним как Ильченко трахнул Колю када он напарил о 0.12 микронной технологии. Тут надо напарить о толщине области пространственного заряда:

$$l = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\Delta\phi}{qN}}$$ N – конц примеси. Например для кремния $\Delta\phi = 0.8V, N = 10^{16}см^{-3}, l_0 \approx 0.3мкм$ это фызыческие

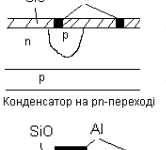
ограничения (тут канешна можна поиграть с концентрацией примесей поднять там на порядок или на два сделать n++ ☺) Дальше есть технологические ограничения: литография (ограничение на длину волны: ульрафиолет 0.2 мкм и до рентгена 2нм)
Груповое ограничение это наверна имеецца ввиду изоляция элементов (читай 5.19) Кароче чувак удачи!



Ec+Ev)/2.. При напрузі стік-виток = 0 під затвором товщина канала буде однакова. При напрузі >0 протікає струм і вибудвається падіння потенціалу вздовж каналу. Тому різниця потенціалів між затвором і підкладинкою меншає вздовж затвору. При певній напрузі – напрузі насичення – глибина каналу стає рівна 0 на кінці затвору – утворюється горловина каналу. При подальшому зростанні напруги витік-стік канал виходить на поверхню на певній відстані від стоку. Відбувається вкорочення каналу. При цьому струм через транзистор перестає залежати від напруги на затворі - насичення. При подальшому збільшенні поля, що тягне носії буде відбуватись їх розігрів, тобто електрони не віддаватимуть всю енергію ґратці при зіткненні з нею. При цьому видбувається зменшення рухливості носіїв струму. Аби поглибити канал, до підкладинки прикладають негативний потенціал відносно витоку. Відбувається подвійне керування струмом. Дві пропозиції зміни конструкції для зменшення розмірів транзисторів – вкорочення каналу та збільшення рухливості носіїв. 1 пропозиція стосується введення нижнього затвору – утворення двозаторних структур. Симетричність конструкції призводить до значного зменшення ефекту короткого каналу. 2 метод - підвищення рухливості носіїв – використання спеціальним чином викривлених кремній-германієвих шарів (гетероструктури).



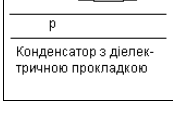
5.12 МОН-транзистори. Нехай, поверхневий потенціал = 0. При напрузі на затворі = 0 канал буде відсутнім. Буде два p-n переходи зустрічно ввімкнених. Тому опір буде великим. При Uзатвору > 0 буде вигин зон і при певній величині напруги утвориться інверсійний канал. При будь-якому контакті н.п. з поверхнею буде вигин зон. Для утворення інверсійного каналу необхідно, аби рівень фермі перетнув рівень електростатичного потенціалу



Однак такі резитори мають недоліки. Між p-областю резистора і n-областю основи виникає p-n-перехід. Щоб звести до мінімума вплив цього переходу, до n-шару в робочому стані прикладають позитивний потенціал порівняно з p-областю. При такій напрузі перехід буде запертий. p-n-перехід також має деяку ємність, значення якої вдомо залежить від його площі, тому для зменшення цього впливу резистори роблять з малими площами переходу.

Провідники виготовляють переважно з алюмінію. Це пояснюються тим, що алюміній та кремній "n+"-типу утворюють гарний омічний котакт. Але іноді використовують золото, плантину, кобальт.

Конденсатор на pn-переході

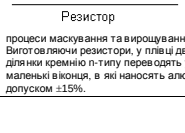


Конденсатор з діелектричною прокладкою

Конденсатори в ІМС бувають 2-х типів: 1)на основі p-n-переходу; 2)з діелектриком між обкладками з окису кремнію. Будь-який p-n-перехід можна уявити, як 2 обкладки конденсатора, розділені діелектриком (запірний шар має малу концентрацію носіїв струму і великий опір). Тому в запірному шарі перехід має ємність. Із збільшенням запірної напруги ширина запірного шару збільшується, а ємність переходу зменшується. Цю властивість використано в конденсаторі на p-n-переході. Але такі конденсатори мають ряд недоліків: залежність ємності від прикладеної напруги, неможливість дістати великі ємності і низька добротність. Проте такі конденсатори дешеві, тому їх використовують у тих випадках, де не ставляться великі вимоги до конденсаторів. Значно кращі характеристики конденсатора з діелектричною прокладкою з окису кремнію. Такий конденсатор неполярний, має більшу добротність і розрахований на більші напруги.

5b.13. ПЛІВКОВА ЕЛЕКТРОНІКА. ОСНОВИ ПЛІВКОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ. НАНЕСЕННЯ ПЛІВОК. ПЛІВКОВІ ЕЛЕМЕНТИ: ПРОВІДНИКИ, РЕЗИСТОРИ, ЄМНОСТІ.

У плівковій технології уся елементи і з'єднання виконано у вигляді плівок, нанесених не поверхню діелектричної підкладки. Якщо елементи ІМС виконані з плівок завтовшки до 1мкм, то такі ІМС називають тонкоплівковими, якщо товщина плівок понад 1мкм (порядку 10-50мкм) – товстоплівковими ІМС. Плівки наносять епітаксіальним нарощуванням шару напівпровідника чи металу. Щоб наростити на поверхню пластини кремнію p-типу шар кремнію n-типу використовують реакцію відновлення кремнію з тетрахрориду кремнію ($SiCl_4$) воднем: $SiCl_4+H_2=Si+4HCl$. Щоб наростити плівку n-типу, у потік сумішу H_2 і $SiCl_4$ додають (у строго визначеній кількості) фосфін H_3P (для p-типу – диборан B_2H_6). Епітаксійний шар нарощують у реакторі, який являє собою кварцову трубку, вміщену у високочастотну індукційну пч. Відполіровані кремнієві пластини розміщують на графітових підставках. Трубу продувають інертним газом (щоб очистити її від повітря), потім наповнюють воднем і в індукційній печі нагрівають до 1200°С. Через камеру пропускають HCлдля очищення й газового травлення поверхні кремнію. Потім подається суміш $SiCl_4$, H_2 і H_3P. Поблизу кремнієвих пластин створюються такі умови, що молекули $SiCl_4$ і H_3P розкладаються тільки біля поверхні поверхні пластин. На поверхню пластин кремнію у вузлах кристалічної решітки осідають атоми кремнію і домішки фосфору. Швидкість нарощування 1мкм/хв. Після утворення плівки потрібної товщини подачу суміші припиняють і пластини охолоджують струменем водню. Епітаксійне нарощевання можна виконати також напиленням. Якщо перед вирощуванням плівки на поверхню помятити маску (шаблон), то шар речовини утвориться лише у потрібних місцях. Таким чином комбінуючи процеси маскування та вирощування плівок можна виготовити плівку довільної конфугурації.



Виготовляючи резистори, у плівці двоокису кремнію витравлюють вікно певних розмірів. Потім методом дифузії частину відкритої ділянки кремнію n-типу переводять у p-тип. Після цього знову наносять шар двоокису кремнію. У цьому шарі витравлюють 2 маленькі віконця, в які наносять алюмінієві контакти. Таким способом можна виготовити резистори опром до сотеть кілоом з допуском ±15%.

Термічне окислення. Проводять в ріних окислюючих середовищах: в сухому та зволоженому кисні, парах води при атмосферному чи збільшеному тисках(до 500 атм.). Кремній на поверхні окислюється завжди і так в повітрі, щоб йому допомогти його добряче нагрівають (до 1200 С)
Як і при газовій епітаксії використовується кварцева труба, через яку пропускається окислювач.
Механізм окислення має два варіанти: 1) спочатку кремній дифундує крізь поверхневу плівку оксиду, абсорбція по верхньою кисня, з газу, власне окислення; 2) адсорбція кисню, та дифузія його крізь плівку окису, і там вже окислення.
На практиці працюють обидва механізми, але другий грає більшу роль.

Шар оксиду збільшується з часом за такою напів імперичною формулою $d \approx k\sqrt{t}$, де k параметр, який залежить від вологості, температури і ще багато чого.
Сухе окислення іде набагато довше вологого. Проте при сухому окисленні набагато менша кількість дефектів. Часто їх чередують.

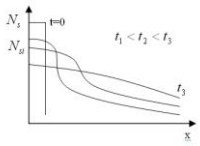
5.b.14 Отримання шарів оксиду кремнію. Термічне оксидування. Малі та великі терміни оксидування.

Оксид кремнію виконує такі функції в мікроелектроніці: захист поверхні переходів, схем, функцію маски, функцію тонкого діелектрика (наприклад для МОН транзисторів).
Методи отримання оксиду кремнію:
Пролітичне окислення . Використовується терморозпад кремній – ограничних сполук. Наприклад плівки SiO2 можна отримати за допомогою електричного розряду в суміші тетрахлориду кремнію SiCl4 і озону. Вони подаються в робочу камеру в фазі пари ; процес може проходити при кімнатній температурі : SiCl4 + 2O3 => SiO2 + 2Cl + 2O2
Анодне окислення . Проводиться в рідинному електроліті. Швидкість зростання оксидної плівки визначається напруженістю електричного поля в плівці. Вона визначає міграцію іонів Si від поверхні Si – оксид до поверхні Si – електроліт , де відбувається окислення. Анодне окислення проволиться або при сталому струмі, або при сталій напрузі. Як електроліт використовують вищі спирти, гюколі, гліцерин. Для регулювання провідності електроліту вводять H3PO4, NaOH, KNO3 та інші. Аніони цих сполук грають роль окисників.
Хімічне окислення. Поверхня обробляється сильними хімічними окисниками(для Ge і Si – суміш азотної і плавикової кислоти). Кількість азотної кислоти значно більша , і процес окислення поверхні напівпровідника переважає над процесом розчинення оксидної плівки. Оксидна плівка при хім. окисленні має високу щільність і значну товщину. Іноді застосовується метод розпилення Si в окислюючому середовищі за умов відповідного розрядження (киснева плазма при низьких температурах), але найпоширеніший наступний метод:

λ – зміна інтегрування, розв'язок має вигляд $N(x,t) = N_s erfc \dfrac{x}{2\sqrt{Dt}}$ erfc – доповнення функції похибок до одиниці.

Дифузія із обмеженого джерела домішки. Має місце, коли граничною умовою є абсолютно непроникна поверхня. При цьому потік відсутній при всіх значеннях $t \geq 0$:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial x} = 0 \text{ , при x = 0.}$$



Умови для такої дифузії отримують наступним чином. В тонкому шарі н/п пластини d створюють надлишкову концентрацію домішки N_s , після чого поверхню пластини покривають матеріалом з значно меншим ніж у н/п коефіцієнтом дифузії і нагрівають. Під час нагріву відбувається дифузія в середину пластини, а на її поверхні потік домішки майже дорівнює нулю. Початкові умови наступні:

$$N(x,0) = \begin{cases} N_s, 0 \leq x < d \\ 0, x > d \end{cases}$$ Розв'язок рівняння другого закону Фіка має вигляд: $N(x,t) = \dfrac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp[-(\dfrac{x}{2\sqrt{Dt}})^2]$,

представляє собою розподіл Максвела.

Іонна імплантація. Іонне легування полягає в наступному. Іони домішки, які отримуються з спеціальних джерел, прискорюються і фокусуються в електричному полі, попадають на підкладку, бомбардуючи її. Маючи велику енергію вони проникають в поверхневий шар н/п. При проникненні, іони втрачають свою енергію, наслідок кулонівської взаємодії та при ударах з ядрами – утворюється велика кількість точкових дефектів. В загальному випадку атоми домішки займають хаотичне положення. Для впорядкування зруйнованої структури, підкладку відпалюють при температурі 650-700С.

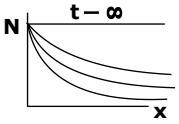
5.15 Легування напівпровідників. Термічна дифузія з нескінченного та обмеженого джерела домішки. Іонна імплантація.

Методи дифузії є основними і найбільш поширеними при легуванні напівпровідників. Дифузія – переміщення частинок в напрямку зменшення їх концентрації. Швидкість дифузії залежить від градієнта концентрації атомів прямопропорційно.
Перший закон Фіка. Характеризує швидкість дифузії атомів одної речовини в іншу при незмінному градієнті їх концентрації:

$\vec{J} = -D\nabla\vec{N}$, де $\vec{J}$ – вектор густини потоку атомів речовини, D – коефіцієнт дифузії, $\nabla\vec{N}$ – вектор градієнта концентрації дифундуючих атомів. Одновимірне рівняння Фіка: $J(x) = -D\dfrac{\partial N}{\partial x}$

Другий закон Фіка. Визначає швидкість накопичення речовини в площині перпендикулярної до напрямку дифузії. Одновимірний випадок: $\dfrac{\partial N}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}(D\dfrac{\partial N}{\partial x})$ при постійному коефіцієнті D, рівняння набуває вигляду: $\dfrac{\partial N}{\partial t} = D\dfrac{\partial^2 N}{\partial x^2}$

Термічна дифузія з нескінченного джерела домішки.
Нескінченне джерело – стан системи при якому кількість атомів, які перейшли в напівпровідник з поверхневого шару (шар біля н/п) дорівнює кількості атомів, які надійшли до поверхневого шару. Початкові та граничні умови:



$$\begin{cases} N(x,0) = 0, \\ N(0,t) = N_s \\ N(\infty,t) = 0 \end{cases}$$ x – відстань від поверхні, N_s – поверхнева концентрація домішки.

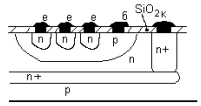
Рішення другого рівняння Фіка має вигляд:

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

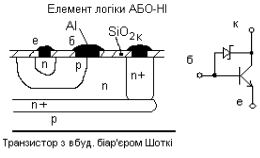
Потім роблять фінальне зменшення розмірів до оригіналу. Проте роздільна здатність обмежена дифракцією. **Рентгенівська літографія.** Шаблон – матеріал, прозорий для рентгена(органіка, кремній), і нанесений малюнок із золота. Він розміщується на відстані 10 мікрон від підкладинки. Опромінення рентгеном. **Електронно-променева літографія.** Іде опромінення електронорезиста через металеву маску з отворами, потім лінзами фокусується. Така маска отримується методом звичайної фотолітографії. В іншому варіанті маска наноситься на фотокатод, при опроміненні якого вилитають електрони. У методі сканування шаблон відсутній. А променем керує комп'ютер. При цьому, при растровому методі промінь проходить усю площину, вмикаючи вищу інтенсивність там, де це необхідно. При векторному проході промінь викреслює просто фігури. Але Існує розбухання з відстанню променя, тому доводиться зменшувати інтенсивність променя. Таким чином випалюється наприклад, маска для рентгена. Маємо еталон. Потім з еталону роблять робочі копії. **Іонно-променева**. Чутливість резистів до іонів значно більша, ніж до електронів, тому при менших інтенсивностях досягається кращий результат. Сканування поверхні відбувається так само.

5.16 Літографічні процеси у мікроелектроніці

В технології напівпровідникових приладів важливе місце займають маски: вони забезпечують локальний характер напилення, 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 поверхні у утворенням SiO_2 2. нанесення фоторезисту. Краплю наносять на поверхню, потім на центрифузі розкручують для утворення тонкого шару. 3. висушують. 4. експозиція - накладають фотошаблон і опромінюють, як правило, світлом кварцевої лампи. 5. проявка. Існують позитивні та негативні фоторезисти. „+" - руйнуванням того, що експонувалось. „-" навпаки. Нестійкі ділянки змивають. 6. травлення SiO_2 до Si. Для суміщення фотошаблонів на них наносять спеціальні мітки, і при утворенні чергової маски їй під мікроскопом суміщають.
Виготовлення фотошаблонів. На великому листі паперу малюють збільшений варіант кожного з шарів. Потім зменшують раз в 10-100. Роблять мультиплікацію – тобто розмножують малюнок, оскільки у технологічному циклі буде виготовлятись багато таких пристроїв на одній підкладинці.



Елемент логіки АБО-НІ

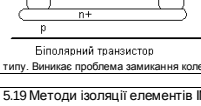


Транзистор з вбуд. біар'єром Шоткі

має бути більшою, ніж товщина зміщення $\ell_n = \sqrt{D_n \tau_n}$, де D_n , τ_n - коеф. та час дифузії. У сучасному транзисторі роблять прошарок сильно легованої області, яка ефективно збирає електрони, тим самим зменшується опір кола колектора. Спочатку беруть підкладкур-провідності, на ній вирощують шар n-типу, яку легують дифузією. За допомогою масок стравлюють всю товщину де знаходить база і емітер. В створеній порожнині вирощують шар n-типу, в якому по-черзі витравлюють місце під базу, а потім аналогічно під емітер. Для забезпечення ізоляції між транзисторами можна витравити порожнини (мези). Іноді ізоляцію роблять за допогою карманів – спочатку витравлюють кармани, я потім в них вирощують елементи.
За допомогою біполярного транзистора можна реалізувати елемент логіки АБО-НІ. Якщо створити транзистор з кількома емітерами, то струм в колі колектора з'явиться, якщо з'явиться струм у колі будь-кого з емітерів.
Іноді дуже важливо, щоб швидкість перемикання приладу була найбільшою. Ця швидкість визначається тим часом, за який з бази ми можемо розсмоктати заряд. Для цього роблять контакт на базі з алюмінію, який замикаю p-область бази та n-область між базою та колектором. Тут використано те, що Al-p створює бар'єр для дірок, а Al-n є гарним омічним контактом.

5b.17. ІНТЕГРАЛЬНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ МІКРОСХЕМИ (ІНМС АБО ІМС), ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ. АКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ. БІПОЛЯРНИЙ ТРАНЗИСТОР. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ ІМС. ТРАНЗИСТОР З БАР'ЄРОМ ШОТТКІ. БАГАТОЕМІТЕРНИЙ ТРАНЗИСТОР. (ANCHOR)

Інтегральною напівпровідниковою мікросхемою наз. мініатюрний функціональний вузол електронної апаратури, елементи й з'єднувальні провідники якого виготовляються єдиним циклом і об'ємі або на поверхні матеріалу підкладки. За один цикл виготовляють багато ІМС (300-1000 шт. на одній підкладці). Залежно від технології розрізняють напівпровідникові, плівкові, планарні та гібридні ІМС. У н.п. ІМС усі елементи містяться на поверхні або в об'ємі підкладки з н.п. Компоненти схеми з'єднуються шаром н.п. з високою провідністю або напиленим на захисний шар кристалу металічним провідником. У плівковій МС усі елементи і з'єднання використано у вигляді плівок, нанесено на поверхню діелектричної підкладки. Якщо елементи виконані з плівок завтовшки до 1мкм – тонкоплівкові ІМС, понад 1мкм – товстоплівкові ІМС. Планарна ІМС передбачає існування усіх елементів у тонкому епітаксіальному шарі з н.п.. ІМС, в яких є пасивні елементи (R, C, L), виготовлені за плівковою технологією, й активні елементи (діоди, тринзистори) – виготовлені в кристалі н.п. наз. гібридними ІМС. За ступенем інтеграції елементів розрізняють: 1)проста ІМС (до 10 ел.); 2)середня ІМС (до 1тис. ел.); 3)велика ІМС (до 100тис. ел); 4)надвелика ІМС (>1 млн.).
Активними елементами в ІМС є діоди та транзистори. Розглянемо детальніше технологію виготовлення біполярного транзистора. При виготовленні біполярного транзистора намагаються зробити найтоншу базу, а це вдалося зробити для n-p-n типу. Виникає проблема замикання колекторів, яку можна вирішити створюючи область іншої провідності. Товщина її



Біполярний транзистор

Повітря
Технологія кремній на сапфірі (SOS – Silicon on Sapphire) Сапфір має таку ж структуру ґратки як і кремній тому на сапфірі можна нарощувати епітаксійний шар кремнію який потім протравлюють аж до сапфіру і таким чином маємо окремо повітрям-ізольовані кармани. Недолік: рельєфність що серйозно затрудняє металеву розводку.

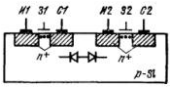
Число елементів в інтегральній мікросхемі характеризує її **ступінь інтеграції.** По цьому параметру всі мікросхеми умовно ділять на малі (до 10^2 елементів на кристал), середні (10^3) Великі (10^4), надвеликі (до 10^6), ультра великі (до 10^9) та гігавеликі (більше 10^9 елементів на кристал).

Найбільш високим ступенем інтеграції володіють цифрові інтегральні мікросхеми з регулярною структурою: схеми динамічної і статичної пам'яті, постійні і перепрограмовані ЗП. Це пов'язано з тим що доля поверхні яка припадає на металеві між з'єднання набагато менша ніж в схемах з нерегулярною структурою.

(На питання які особливості ВІМС треба буде морозитися тому, що по суті я нічого не знайшов) Почати можна буде з логічних ВІМС (тобто цифрові як було зазначено вище ВІМС тільки цифровими і роблять оскільки тут необхідно великий ступінь інтеграції). Оскільки розробка конкретної ВІМС займає багато часу (40-60 тижнів)та ресурсів то в основному використовують вже раніше розроблені блоки (готові) і якось їх з'єднують так щоб отримати необхідну функціональність заданої ВІМС (це дає змогу значно зменшити час на розробку). Такі ВІМС створюють на базі Базових Матричних Кристалів (БМС) або бібліотек схемно-топологічних фрагментів. І центральній частині БМК розташована матриця логічних елементів (вентилів) а по периферії кристалу допоміжні елементи які утворюють вихідні і вхідні каскади.
До основних достоїнств матричних ВІМС відносять низьку потужність яку вони потребують, висока шумостійкість, і менше число операцій при виготовлені. Основний недолік: неповне використання елементів БМК і як наслідок площі кристалу необхідної для реалізації ВІМС. Приблизно в два рази можна зменшити площу якщо спроектувати з «нуля» ВІМС.

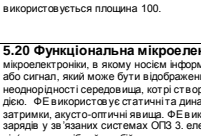
Думка йде далі.....розтікається і багатіє.....:)
Ступінь інтеграції можна збільшувати якщо збільшувати розмір кристалу або відстань між елементами. Також в ВІМС напр.. можна використовувати один і той же участок для різних цілей: наприклад схеми з інжекційним живленням в них епітаксійний шар служить базою для p-n-p та одночасно емітером для n-p-n, а база n-p-n є емітером для p-n-p.
Насичення: чим більше ступінь інтеграції тим більше виділяється потужності на од. площі, тому вся ця байда сильно гріється. Ще одна проблема: металева розводка. Чим більше елементів тим важче зробити планарну розводку в декілька шарів.

5.19 Методи ізоляції елементів ІМС: зворотно зміщені p-n переходи; тонкі шари оксиду кремнію, повітряні проміжки, діелектрики. Великі інтегральні мікросхеми (ВІМС), їх особливості. Насичення ступеня інтеграції.



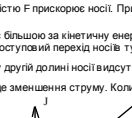
По суті ізолювати необхідно лише біполярні транзистори (n-p-n) оскільки їх колектори виявляються зв'язаними через n-підкладку. Для МДН транзисторів ізоляція сусідніх стоків і витоків вникає сама по собі (їх розділяє два зустрічно включених p-n переходи) Відносно обміну носіями які створюють канал, то він можливий лише при відстанях менших за 5-10 мкм. Тому МДН транзистори можна досить близько розташовувати та їх непотрібно ізолювати. Ізолюють біполярні транзистори.

Є два основні методи ізоляції зворотно-зміщеним p-n переходом і діелектриком (повітря або SiO_2).
Зворотно-зміщений p-n перехід:
Досягають такого ж ефекту як і в МДН. Роблять це таким чином: біполярні транзистори поміщають на p-підкладку. В результаті їх колектори (n) виявляються ізольованими зворотно-зміщеним p-n переходом. Це однофазний метод (оскільки вся структура виконується на одному матеріалі - Si). **Недолік:** наявність зворотних токів та великих бар'єрних ємностей.
Діелектриком:



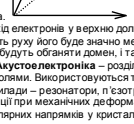
Оксид кремнію: є дві основні технології: ЕПІК та V-канавками. Основна ідея: зробити кармани на одній підкладці ізольованими один від одного шаром оксиду кремнію.
Епік:
За допомогою травлення в підкладці n з верхніх n+ шаром роблять канавки потім поверхню окислюють і покривають шаром полі кремнію потім це все діло перевертають і відрізають аж до дна канавок.
V-канавками:
Дещо схожа ситуація але тут використовують анізотропні травники. Тому канавки у нас мають форму буковки V.. Перевага: мала площа під ізоляцію. Недолік: використовується площина 100.

неоднорідності – зміна легованості на проміжку, поперечного перерізу. Динамічні – коли зарядовий пакет в околі стат.
Неоднорідності локально змінює миттєве значення концентрації зарядів, що призвадить до змін опору лінії. **Прилади із зарядовим зв'язком .** Використовується здатність накопичувати, зберігати та контрольовано пересувати інверсних за знаком носіїв у потенціальних ямах збіднених основними носіями, перетворення оптичних сигналів у електричні, які можуть бути зсунуті і перетворені у відеосигнал. Можливості – аналогове та цифрове підсумовування, ділення та підсилення зарядів. Напруги на затворах створюють динамічні неоднорідності у вигляді локалізованих пакетів поторового заряду неосновних носіїв,тобто утворюється система заряджених конденсаторів. Для створення інверсії необхідно або потенціал був більше критичного. Тоді в дане місце насмоктується неосновні носії із сусідніх областей за час релаксації, або за рахунок теплової генерації за час формування заряду. **Діод Ганна** . використовуються домени сильного поля, що виникають шляхом міждолинних переходів(при напруженостях полів, більших за критичні) і дрейфують під дією електричного поля. У деяких напівпровідників, таких як AsGa



можуть мати багатодолинну дисперсійну криву. . Ефективні маси у електронів у різних долинах рівні. $\mu = \dfrac{e\tau}{m^*}$. Електричне поле з напруженістю F прискорює носії. При $eFl > \Delta E$ - більше втрат при розсіянні електрони починають збільшувати свою енергію, яка стає більшою за кінетичну енергію теплового руху. Коли набутої енергії стане досить, аби закинути носії у другу долину, почнеться поступовий перехід носіїв туди. Але там рухливість є значно меншою.

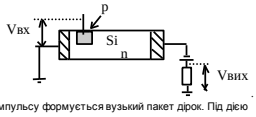
$J = en_1\mu(m_1)F + en_2\mu(m_2)F$. Спочатку у другій долині носії видсутні і спрум прямо пропорційний полю. При набутті достатньої енергії і переходу у другу долину іде зменшення струму. Коли всі носії у другій долині, іде знову лінійний ріст. У місці спаду струму диференціальна провідність від'ємна.



. Нехай, а якійсь ділянці буде флуктуація напруженості. Тоді у цьому місці відбудеться перехід електронів у верхню долину. Їх інших точках напруженість зменшиться. Виникне динамічна неоднорідність домен. Швидкість руху його буде значно менша швидкості руху електронів у інших ділянках. Нехай, рух іде зліва направо. Тоді зліва електрони будуть обганяти домен, і там буде негативний заряд, а справа електрони випередили домен, і там буде позитивний домен. **Акустоелектроніка** – розділ електроніки, у якій вивчається і використовується взаємодія акустичних хвиль з електромагнітними полями. Використовуються такі фізичні процеси – п'єзоелектричне ефект, електрострикція. Електрон-фононна взаємодія. Прилади – резонатори, п'єзотрансформатори, корелятори. **Взаємодія акустичних і електричних коливань.** Виникає зміна поляризації при механічних деформаціях за відсутності поля. Виникають у кристалах, що не мають центра симетрії. Тобто, при наявності полярних напрямків у кристалі.

5.20 Функціональна мікроелектроніка.

Функціональною електронікою(ФЕ) називають такий напрям розвитку мікроелектроніки, в якому носієм інформації служить багатовимірний сигнал, наприклад поле електромагніної(або іншої) хвилі або сигнал, який може бути відображений зарядовим пакетом (пакетом густини або слідів), параметрами якого керують динамічні неоднорідності середовища, котрі створюються під дією керуючого сигналу та керовано переміщуються або змінюються під його дією. ФЕ використовує статичні та динамічні неоднорідності. Наприклад – діод Ганна, випрямляч струму на ефекті Пельтьє, лінії затримки, акусто-оптичні явища. ФЕ використовує такі явища, як : 1. скінні швидкості дрейфу основних носіїв струму 2. зміщення зарядів у зв'язаних системах ОПЗ 3. електричні неоднорідності(домени сильного поля), плазмові явища твердих тіл(лавиноподібний пробій, шнури струмів, коливання плазми), 4. взаємодія електро-магнітних хвиль з фононами і спіновими звилями 5. п'єзострикція 6. взаємодія когерентних і некогерентних хвиль із середовищем. **Динамічні зарядові неоднорідності.** Зарядові пакети створюються за рахунок інжекції надлишкового заряду. З контакту метал-н.п. можна інжектувати, приклавши напругу, яка зменшить бар'єр контактної різниці потенціалів і збільшить ймовірність надбар'єрної або тунельної емісії. Таке можна зробити і квантами світла. Час життя буде визначатиметься умовами генерації та рекомбінації неосовних носіїв. У перший момент заряди будуть розподілені нерівномірно по об'єму і можуть мати надлишкову енергію та імпульс. Проте через зіткнення з граткою пройде процес термалізації за час релаксації 10^{-10}с, і всі носії будуть енергетично рівномірно розподілені $n = n_i \exp\left\{\dfrac{E - E_i}{KT}\right\}$ - концентрація нерівноважних носіїв, E_i- середина заборонної зони. У слабких полях $L = \sqrt{2D\tau}$ D- коеф.дифузії, τ - час життя. У сильних полях $L = \mu F\tau$ F – напруженість а μ - рухливість. Якщо часу достатньо, то він доходить до протилежного кінця н.п.**Прилади із зарядовими пакетами інжектованих надлишкових носіїв.** Використ. скінченна шв. їх дрейфу в напівпровіднику протягом часу їхнього життя та взаємодія пакету під час руху із статичними да динамічними неоднорідностями, своєрними керуючим сигналом. Будують лінії затримки. Найпростіша схема



. Вхідний імпульс Vвх <0 спричиняє інжекцію дірок у об'єм кремнія. За час дії імпульсу формується вузький пакет дірок. Під дією поздовжнього електричного поля з різницею потенціалів V < 0 він рухається до іншого контакту. $V_{dr} = \mu_p V / L$.

$t_{dr} = L / V_{dr} = \dfrac{L^2}{\mu_p V}$. Опір провідника з пакетом менше, ніж без нього $\Delta R = R - R_{пак} = [\rho - \rho_{пак}]\dfrac{\Delta L}{S}$, ΔL -розмір пакета, S –площа перерізу.

Менший опір пакету приводить до збільшення вихідної напруги, що пада. На вихідному опорі. $V_{вих} = \dfrac{VR}{R - \Delta R}$. Статичні