

Технологічні основи наноелектроніки

2 к.р. 25 балів кожна

72 год. наб. роб.

34 год. лекцій.

50 балів залік.

Відвідування обов'язкове!!! Без записки!!!

Електроніка — наука про взаємодію заряджених тіл, законів і методів створення електронних приладів і пристроїв, що використовуються для передачі, обробки і зберігання інформації.

Мікроелектроніка — галузь електроніки, що охоплює проблеми створення і функціонування ел. пристроїв мікросхеми.

Наноелектроніка — галузь електроніки, що займається розробкою фіз. і технологічних основ створення нових мікросхем з типовими технологічними розмірами елем. $< 100 \text{ нм}$.

Розвиток електроніки

Перші вакуумні триоди були виготовлені в 1906 р. Л. де Форестом. Зайняв внутрішні дуни скрінки.

1945 р. ENIAC — апарат, комп. на тридних лампах. Виг. вперше з'явився термін в програмуванні. ENIAC на дискретних елементах. 25 тис. ламп. $P_2 = 150 \text{ Вт}$. $P_{\text{заг}} = 3750000 \text{ Вт} = 3,75 \text{ МВт}$.

1 лампа коштувала \$10.

$T = (2 \div 10) \cdot 10^3 \text{ год}$ — час роботи лампи на вигоріву

$t = \frac{T}{N} < 20 \text{ хв.}$ час роботи комп.

Барден, Шоклі, Братейн у 1947 р. відкрили перший наб. транзистор з усіма його класичними властивостями. Транзистор на Ge.

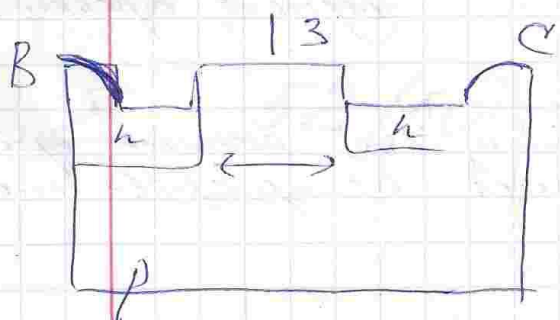
Зараз у якості нрн використ. Si.

1959р Кібі та Нойс зробили першу інтегровану мікросхему з двох транзисторів та двома діодами.

- певний рівень легування $n_{max} < 10^{19} \text{ см}^{-3}$
- при наявності великої к-сті шкідливих домішок (O_2 та C) зменш. рухливості носіїв

$$V_{gp} \sim \mu E$$

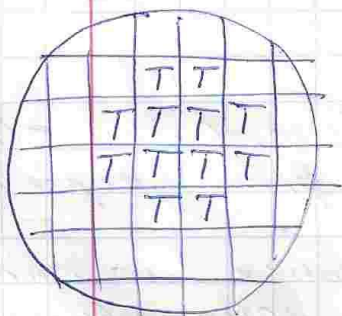
E - напруж. ел. поле



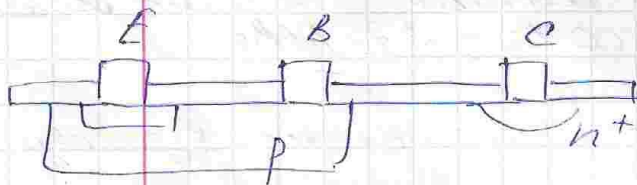
Час переливання транзистора з великого μ малим.

$$\tau = \frac{L}{v_{gp}}$$

SiO_2 - ідеальний діелектрик, який можна використ. в подальшому розвитку ел.



Технологія ~~на~~ з монокристалу кремнію, на якій створ. транзистори. Далі її розрізають, транзистори вставляють в корпус.



1) n^+ широкі н-р діелектрич. ~~на~~ опір між B та C
2) Наяв. слюди у чортовій інтегр. схемі - тригер.

Літографія - основний н-е створення малюнку

Wafer - підкладочка, частина

- 1) нанесення шару оксиду
- 2) нанесення резисту - речовина захищає х-ки під дією збл. випромінюв.
- 3) сушка резисту
- 4) порціювання та експонування резистивності експонованої частини пластини
- 5) травлення резисту
- 6) прогрів - "завербовування" резисту
- 7) контроль малюнка
- 8) травлення оксиду
- 9) травлення резисту - "lift-off" - матиме доступ до кремнію.
- Оксид має пухкий коєр дифузії. При створ. укладення концентрують розповсюд. речовина.
- 10) фінальний контроль.

Інтегральна схема (ІС) або ІМС - мікроел. пристрій з властивостями

- схем. з'єднання між собою багатьох елем. у високому щільному монтажі, це може перевищувати 10^5 елем. на 1 кристалі.
- виконують певну функцію перетвор. і обробки елем.
- може розраховуватися при її використанні експертне цінне до окремих її елементів починають втрачати свою специфічність.
- відповідають в функціону технологічному чипу

Ступінь інтеграції

(по к-сті елементів для цифрових схем)

Маломіт. сх. (MIS) до 100 елем. на кристалі

Серед. і.с. (SIC) - до 1000 елем. на кристалі

Велик. і.с. VLS до 10 тис. елем.

Надвелика MVL до 1 мільй. елем.

Управляв. UVL до 1 млрд елем.

Тігравеліка TVLS > 1 млрд

Елементом ІС називають частину, котра реалізує функцію простого роз'єднання, ЗВ резистора, транзистора, конденсатора, і т.д.

Елемент ІС не можна вигнути

Компонент ІС можна вигнути з ІС і це є ідентифікатором ІС.

Гібридна ІС використовується у МВЧ техніці. Коefіцієнт підсилення не більше 1 в МВЧ.

Закон Мурдона - Мура говорить про ~~зростаючу~~ інтеграцію, шорочку ~~зростаючу~~ елементів. Екстраполяція до 2007 року.

Гарний провірник той у якого малий поточний опір (Cu, Ag)

W в якості першого контакту до Si використовується у W малий коef. з'єднує до Si.

Зервара ІС:

- збільшення часу роботи
- збільшення пропускної здатності
- зменшення розмірів
- зменшення енергоопотреблення
- зменшення вартості.

10.09.
2015

Загальна схема виготовлення ІС

1) Прийняття монокристалічного кремнію - закладок якісних схем. Висота кристалу ~ 17 см. $d = 30$ см; Висота більшої кристал, тим більше дефектів. Дефекти точкові.

Дислокації - теж дефект.

Світовидомо, монокристал виготовляють ІС не можна.

4 мо.

- розріз, механ. обробка, очистка пластмас

2) Формування робочого шару нр на монокристалі - Епітаксія. Мова йде про розклад шару нр з контрольованою кількістю домішок. Товщина шару $\sim 3-4$ нм.

3) Оксидування. Оксид утворює рівномірний шар.

4) Літографія - створення першого малюнка на ІС.

5) Лезування - введення домішок в шар. Матеріал карбоні Вуглець, Сталі, металіди різних канальців.

6) Літографія - створення вуглецевих областей в та с карбоні певного типу (n або p)

7) Лезування

8) Металізація - нанесення шарів металевих плівок

9) Літографія

Точність нанесення всіх шарів має бути ~ 1 нм!
Випадки не допускаються.
Чим більше ступінь літографії, тим більше шарів.

Фізичні обмеження мініатюризації

1) Технологічні обмеження

мова йде про розміри елем. б-я розміру

2) Обмеження функціонування окремих елементів.
МОТРАНСИСТОР не працює при розмірах каналу $L \leq 90$ нм.

3) Групові обмеження

• проблема тепловідводу

4) Масштабування

5) Розмірні ефекти, виникають, коли розмір елем. стан \leq певного парам. перемосу. Зв'язок з елем. параметрами

проводу, який фундаментально к-к рівномірний.
 при $\lambda < \lambda_B$, то функція електронної структури рівномірної.
 $Me \rightarrow n/p$; $n/p \rightarrow$ діелектриком. λ_{eff} між кван-
 товими резонансними ефектами.

6) поверхневі стани.
 $\lambda_{випром}$ проводу $\sim 10 \text{ нм}$.

$$\lambda_B = \frac{12,5}{\sqrt{E, \text{eV}}} (\text{\AA})$$

$$\lambda_B^2 \propto \frac{\hbar}{p}$$

Кристали в мікроелектроніці. Щоб створити нелінійні елементи необхідно провести певну мірку проносів.
 Ефект Тана - при зб. напруж. почин. осцилює.
 На базі монокристалу n/p можна створити плас-
 ки для зниклих нерівностей.

Створення технічних нерівностей.
 На поверхні резисту можна створити області

резист 

оксид

$$r_d = f \frac{\lambda}{\Phi}$$

- для оптичної мікрографії з об-
 мовлення

Φ - апертура

$$\Phi \sim r \sin \alpha$$

r - радіус лінзи



Збільшення Φ призводить до сферичних аберрацій.

$$r_{sf} = C_{sf} \Phi^3$$

$$r = f \frac{\lambda}{\Phi} + C_{sf} \Phi^3 - \text{мимотомія}$$

$$\frac{dr}{d\Phi} = -f \frac{\lambda}{\Phi^2} + 3C_{sf} \Phi^2 \geq 0$$

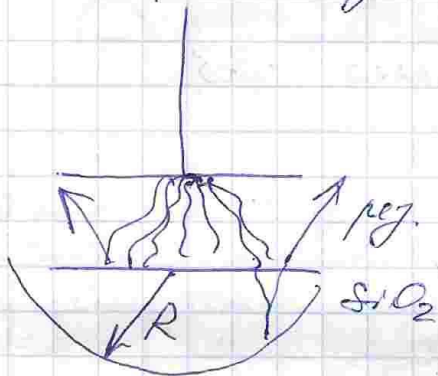
$$3C_{sf} \Phi^4 \geq f \lambda$$

$$\Phi^4 \geq \frac{f \lambda}{3C_{sf}} \quad \Phi \geq \sqrt[4]{\frac{f \lambda}{3C_{sf}}}$$

Φ / f мають оптимальну величину Φ

$\lambda > 150 \text{ нм}$ - для іонів
 При менших довжинах хвилі решту матеріалу
 стало деформувати.

$\lambda \approx 10,6 \text{ нм}$ - для системи дзеркал



УВ. світло потрапляє в резонатор
 при малому діаметрі пучка.
 УВ. світло взаємодіє з резонатором, окислює. Буде відбуватися
 розведення » це друк.
 Це дозволяє створювати високі
 світлолітграфії.

$$R \approx AE^n \quad n \approx 1,5 \div 2,5$$

В негативному резисті розчинність \uparrow і навпаки.

Кожна зайва секунда нагрів підіривки приз-
 веде до розбиття мікроелемента за рахунок дифузії

$$\bar{x} = 2\sqrt{Dt} \quad D - \text{коэф. дифузії} \quad D = f(T) - \text{експоненція}$$

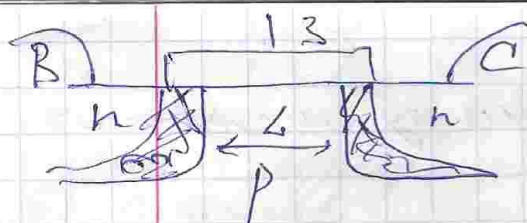
$$n_{cr} = 10^{18} \div 10^{19} \text{ ат/см}^2$$

Вироджений n_F - n_F в еквіваленті статистики
 Максвелла - Больцмана + статистика Фермі.

if $n > n_{cr}$ - це метал.



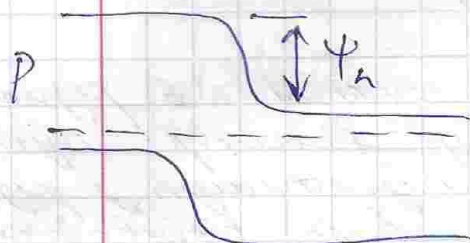
Чим $<$ к-ст. розток в амплітуді, тим $>$ функціоналі
 Обмеження функціонування окремих елементів
 пів викликає 2-х факторів.



поверхне p-n перехода

$$L^* = 2 \frac{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \psi}}{e N_D}$$

N_D - концентрация донорных



ψ - ширина эл.

$$U_0 \sim \frac{\sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_r N_D \psi}}{\epsilon_0 \epsilon_r} \cdot d$$

d - толщина затвора.

$$E = \frac{U_0}{d} = \frac{\sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_r N_D \psi}}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$E_{кр} \sim 10^7 \text{ В/см} \quad 6 \cdot 10^6$$

$$E \leq \frac{E_{кр}}{4}$$

$$N_{D_{max}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$2 \cdot 10^{18}$$

$$L \sim 3L^* \quad L_{max} > 0,1 \text{ мкм}$$

$$0,5 \text{ мкм}$$

15.09.15р. Групповые измерения

$$n \sim 10^9$$

$$f \sim 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$\epsilon \sim 10^{-14} \text{ Дж}$$

8. Измерения на тепловизоре:

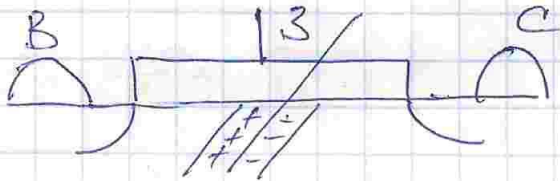
$$P_{max}^{нов} \sim 10^2 \text{ Вт}$$

$$P_{max}^{всд} \sim 5 \cdot 10^2 \text{ Вт}$$

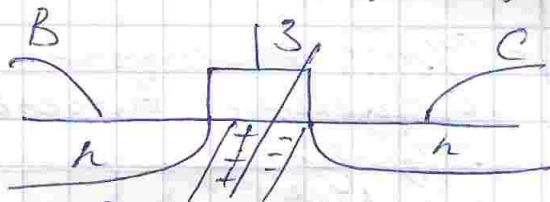
Порядком поручинок
на 1 см².

$$n \cdot f \cdot e = 10^9 \cdot 3 \cdot 10^9 \cdot 10^{-19} = 3 \cdot 10^9 \text{ Бт}$$

2)



Уявимо МОН-транзистор без каналу при попаданні в таку о-мну високочастот. частоту, врівноважує частоту генерування пелену, що ємн. з діф. і електронів. При невисокій частоті інвер. прошит частоту не переверне до інвертування частот (блгу)



← Зливаються провідності, до інвертування частоти. Чим менший розмір, тим більше медресна частота.



$\rho - Si$

$$R = \rho \frac{l}{S} \xrightarrow{\text{масштаб.}} R' = R \cdot k \quad \text{— опр зростає з зменш. розмірів.}$$

$$l = \frac{l'}{k}$$

$$S = \frac{S'}{k^2}$$

Масштабук. сталого потен.

$U' = \frac{U}{k}$ — щоб поле при зм. розміру залишилося сталим, треба зменшувати вольти

$$\tau = \frac{L}{V_{eff}} = \frac{L}{\mu E} = \frac{L^2}{\mu U_{be}}$$

$$E = \frac{U_{be}}{L}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_g W L}{D}$$

ϵ_g - дієва стала діелектрика

$$Q = -C(U_{be} - U_0)$$

U_0 - порогова напруга

$$I = \frac{Q}{\tau} = \frac{\mu \epsilon_0 \epsilon_g W}{L \cdot D} (U_{be} - U_0) U_{be}$$

- струм, де немає несиметричного витокового струму

$$D' = \frac{D}{K} \quad L' = L/K$$

$$W' = \frac{W}{K}$$

$$\tau' = \frac{\tau}{K} - \text{швидкість збільшення}$$

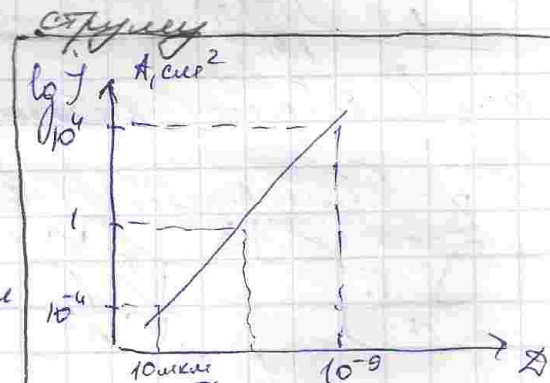
$$C' = \frac{C}{K} - \text{емність рт.}$$

$$I' = \frac{I}{K} - \text{густину}$$

$$j' = j \cdot K - \text{збільшення}$$

$$j_H \leq 10^5 \cdot 10^6 \frac{A}{cm^2}$$

$$j_{cr} \leq 10^6 \frac{A}{cm^2}$$



$D' = \frac{D}{K}$ - не може зменшитися до нуля, бо між заборонами проходить певні п-ел.

if $D' \sim 1$ мм, при забороні му транзисторі будуть великі втрати. Прокорити зменшити струм

Вагатишкова металізація дозволяє зменшити густину струму в провідниках.

рас затримки: $R'C' = RC$ - незмінність часу затримки.

Щоб уникнути цієї проблеми, переходячи на інший тип мікату, щоб зменшити ϵ , використ. SiO_2 перехід від SiO_2 до інших діелектриків.

$$\epsilon' \approx \frac{eU^2}{2} = \frac{e}{kT}$$

$\epsilon' \gg kT$ - if це не викон, то транзистор спонтанно перемикається під дією теплового руху.

22.09.
2015

Розмірні ефекти - ті, що призв. до зміни ϵ при зміні розмірів певної критичної величини.

$$\Lambda_B < d < l$$

↑
довжина вільного пробігу електрона

$$\mu \approx \frac{e}{m} \tau_0 - \text{рухливост}$$

τ_0 - час релаксації

$\epsilon_0 = \epsilon_{\text{пр}} - \text{пробігност}$

$$\tau_0 = \tau_v \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{однакове} \\ \text{час.} \end{array} \right.$$

Нехай в с-м, що підлягає зрушенню.

f_0 - нерухома функція розподілу

$$f - f_0 = (f - f_0) \Big|_{t=0} \cdot e^{-t/\tau}$$

- розсіювання на кристал. ґратці; τ релаксація
- рекомбінація у крп

$$\frac{1}{\tau_0} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}$$

при зменш. розмірів елементів, ціл. вільних механ.

22.09.
2015

релаксаци́, мають їх чиму міжку:
- дисипація (розсілення на фононах)
- рекомбінація

- механізми міждолинного розсілення (ЗЗІ форм-
лет перехід з однієї долини в іншу але при цьому
сильно збільш. енергії)

Найпопулярн. механізми релаксаци́ розсілення на
фононах з свободи τ_p

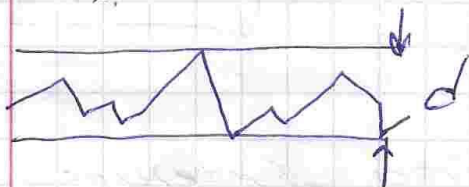
$$\tau_p = \frac{l}{v_T}, \quad l - \text{довжина вільного пробігу}$$

v_T - теплова швидкість

$$\frac{1}{\tau_v} \approx \frac{1}{\tau_p}$$

(*) $\Lambda < d < l$ - умова І класичного дифузійного
ефекту

Λ - довж. хвилі деБройля
Розсілення вбудов. і на границях півки і на
фононах.



$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_v} \left(1 + \frac{l}{d} \right)$$

τ_s - ефективний час розсілення на поверхні

$$\tau_s = \frac{d}{v_T}$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_v \frac{1}{1 + \frac{l}{d}}$$

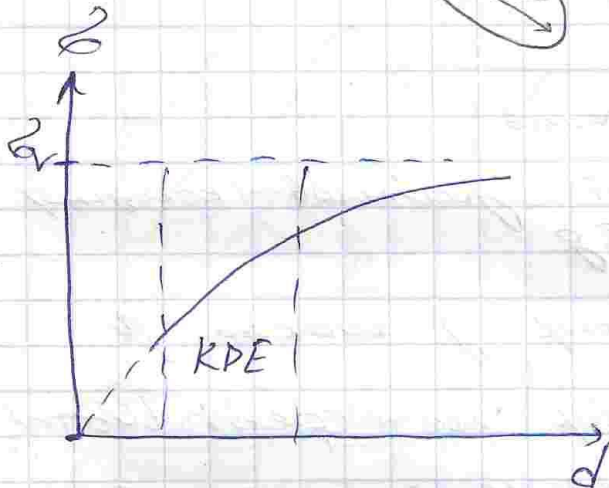
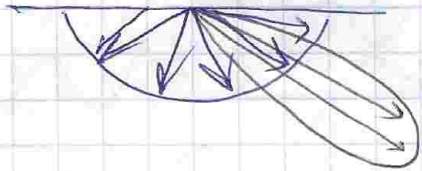
$\sigma \propto \mu n$

зміна руху призводить до
зміни провідності

$$\sigma \propto \frac{1}{\rho_{\text{int}}}$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon \frac{1}{\left(1 + \frac{\epsilon}{d}\right)}$$

Розподіл є кутовим розсієнням + ізотропним, або згортається



KPE - класичний розмірний ефект.

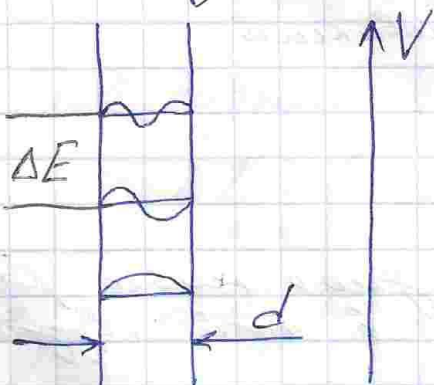
З'являється KPE у штахетях.

1) У м/н KPE не викон, бо не справджується умова (*)

$$\text{Ефективна маса} = \frac{d^2 E}{dk^2}$$

2) KPE у м/н не викон, бо не мають м/н з прийнятним розміром. Товщина м/н без впливу розм.

Квантовий розмірний ефект
Кв. PE виникає, коли $d < \lambda$. Умови розповсюдження дотримуються.



Рух по 2-х інших координ. відбув. як у масивній р-ноч.

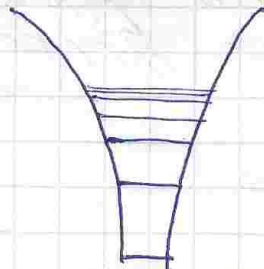
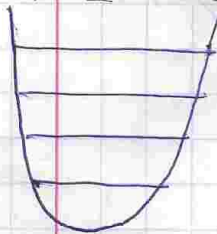
На товщині d можуть іти такі енергії, у яких електронів мало, навіть менше.

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(k_x^2 + k_y^2 + \left(\frac{\pi n}{d} \right)^2 \right)$$

$$n \rightarrow 1, 2, 3, \dots$$

$$\Delta E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* d^2} (2n+1)$$

У параболі рівні енергетичні, у циліндрі - дискретні.



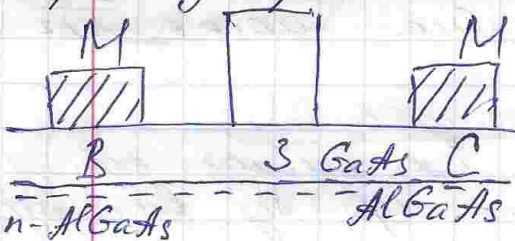
Прийнято для осциляторів

для атомів

При зміні рівня енергії змінюється частота станів і т.д.

HEMT-транзистор - транзистор з високою μ .

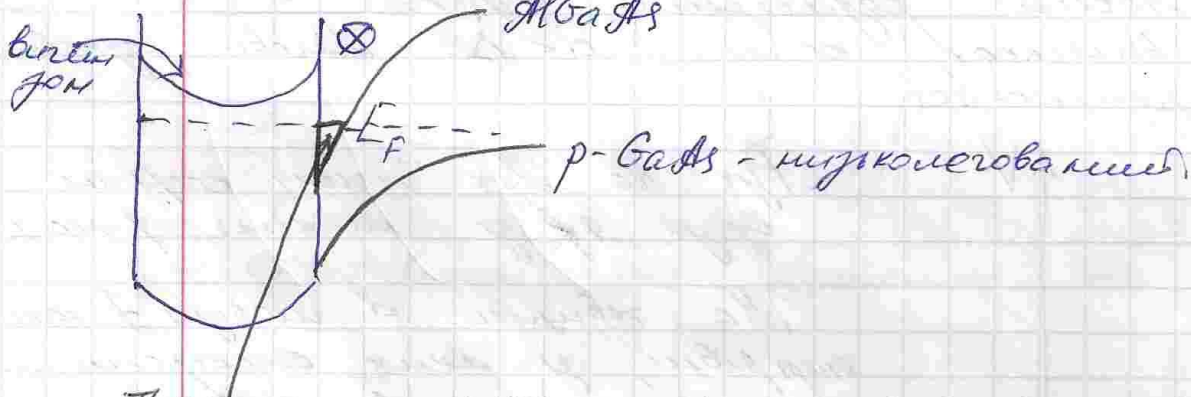
Енергетична діаграма



Затвор на ефекті Шотткі.

AlGaAs вирізняє. Ву GaAs ширшою зони валентної (ширша зона)

Додаткові рівні з'являються у AlGaAs.

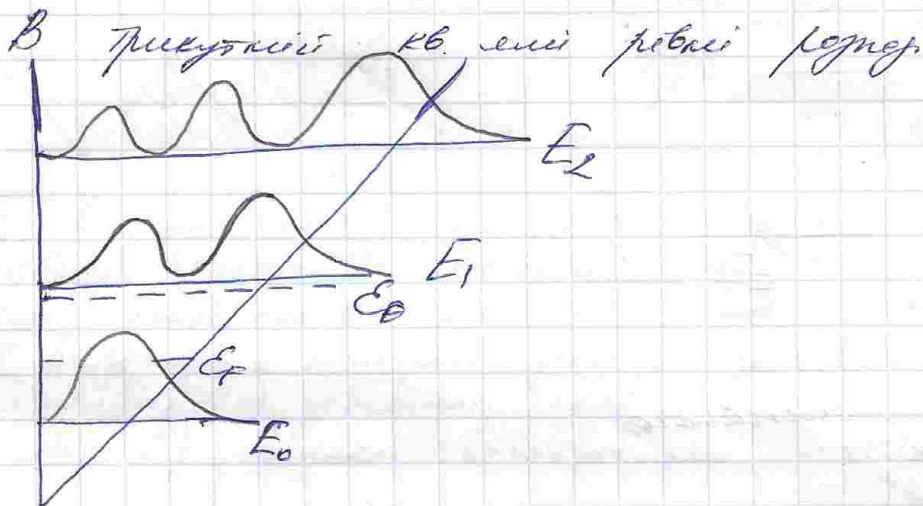


Трикутний потенціал, що з'являється рівні Фермі. Як означає, що рівні в ній будуть заповнені.

При прикладі V рух носіїв відбувається у площині \perp площині.

В такій області з'являються міжзональні рівні \rightarrow фотон, тому він добре розсіюється, тому тільки фотон

єш. мову переприбувати на інший рівень \Rightarrow рухливості велика \Rightarrow високостійкі транзистори росте у гібридних схемах НВЧ.



Умови спостереження квантового розмірного ефекту:

- зростання рухливості
- зростання провідності
- спектроскопію
- оптичними методами

- 1) Вузли між сусідніми рівнями $\Delta E \gg kT$
- 2) Власна ширина рівнів має бути меншою за (вузлів) $\Delta E < \delta \approx \frac{h}{\tau}$ τ - час релаксації

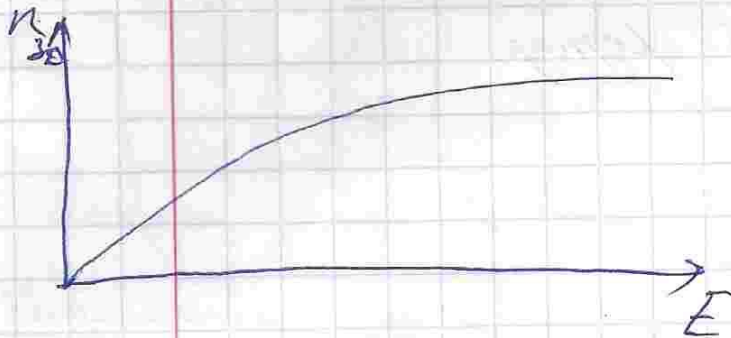
δ визначає час життя на цьому рівні

$$\Delta E > \delta \approx \frac{h}{\tau} = \frac{h}{\mu \cdot \frac{m^*}{e}}$$

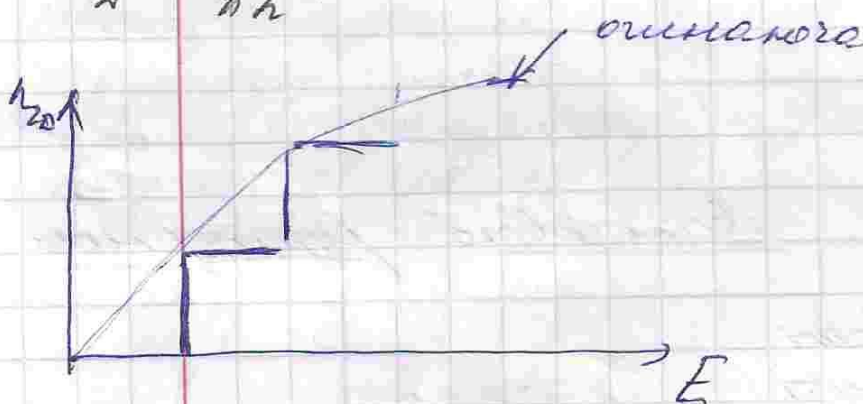
- 3) Розкид по товщинах $\ll 1$ Філівка має бути плоскою
- $$\frac{\Delta d}{d} \ll 1$$

Выразим функцию плотности состояний n

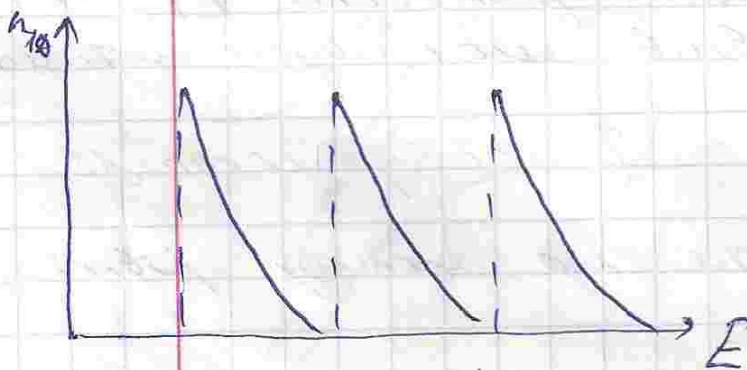
$$n_{3D} = \frac{m}{\pi^2 \hbar^3} \sqrt{2mE}$$



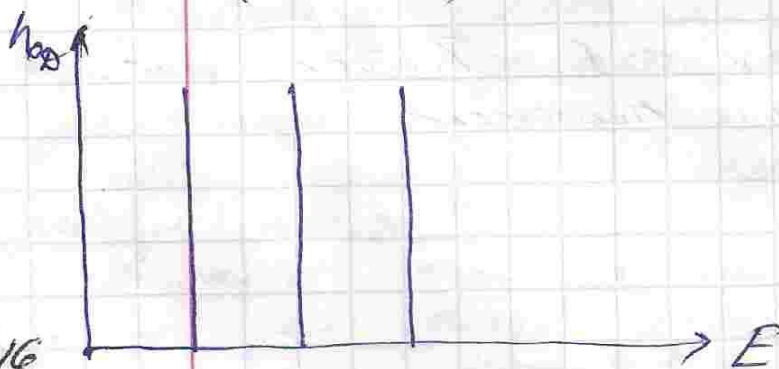
$$n_{2D} = \frac{m}{\pi \hbar^2}$$



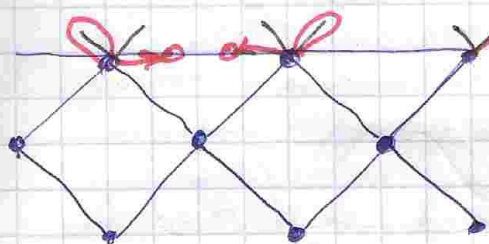
$$n_{1D} = \frac{1}{\pi \hbar} \sqrt{\frac{2m}{E}}$$



$$n_{0D} = \delta(E - E_n)$$



Поверхневі стани, що Γ у м/п мають такі ж саме повед.



Поверхня $S_1(1,0,0)$ буде знах. в напруж. стані

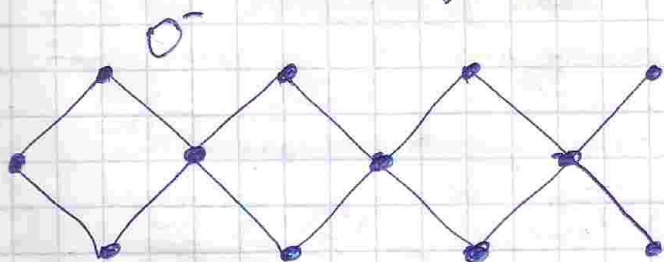
Це зв'язок ковалентний

Γ вільні електрони на поверхневих атомах. Зменш. повної енергії системи відбув. за рахунок того, що поверхневі атоми завб. таким чином, що Γ вільний електрон двобу утворити з атомом. У результаті залиши. менше Γ вільний зв'язок.

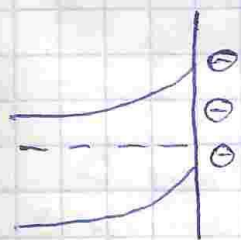
1) Стани Шоклі $\circ \rightarrow \circ \circ \circ \leftarrow \circ$

2) Ділітнікові стани

На поверхню висадж. атом з VI або VII групи ковалентний зв'язок перетв. на іонний зв'язок

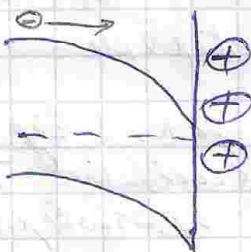


На поверхні утвор. металічний шар \Rightarrow \Rightarrow отримув. такий вигляд зм., який дава- хат електронами з об'ємну рух. до поверхні



Використ. поверхню (100), до рухливості вздовж цієї поверхні найбільша.

Для пухлих Me

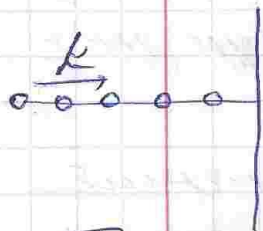


3) Таммівські поверхневі стани

Ел. рух вздовж орбіталь. ланцюга до поверхні з хв. вектором k к напрямку поверхні затухає

Введемо

$\vec{E} = \vec{E}_1 + i\vec{E}_2$ - умовна загукання = ф'з. д'її
хвильового вектора



Таким чином, кількість д'її на поверхні стінки скінки і атомів на поверхні

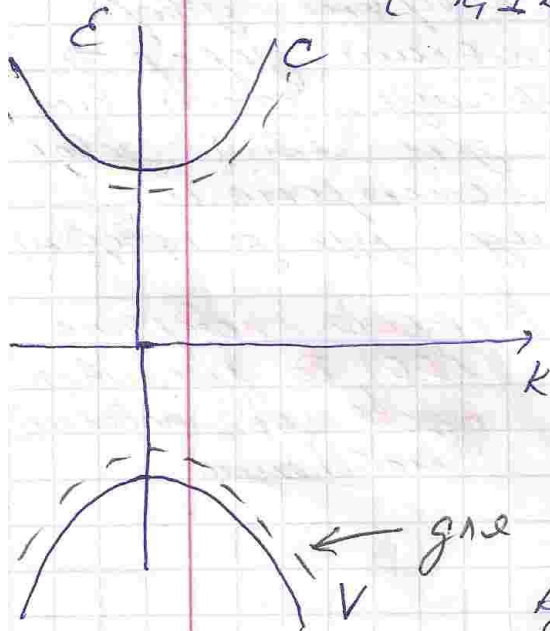
$$n_v \approx 10^{23} \text{ см}^{-3}$$

$$n_s \approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$$

Врахов. умову загукання енергія буде:

$$\vec{E} = \frac{\hbar^2 \vec{k}}{2m^*} = \frac{\hbar^2}{2m} [|\vec{k}_1|^2 - |\vec{k}_2|^2] + i \frac{\hbar}{m} (\vec{k}_1 \vec{k}_2)$$

$$\vec{k}_1 \cdot \vec{k}_2 = 0 \quad \begin{cases} k_2 = 0 \\ k_1 \perp k_2 \end{cases}$$



В д'ї. від того, де знах рівень Фермі. Таке загукання призв. до ~~і~~ поверхневого загукання

Чому \vec{E} загукання на поверхні інтенсивне?

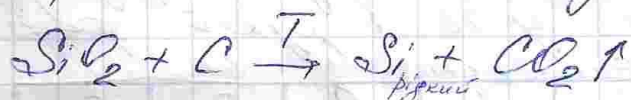
29.09.2015

Вел. концентр. зарядів на поверхні, ~~що~~ може призвести до інверсії провідності. Лункі Me мають заряд 4×10^{15} . Зв'язати їх можна колоною. В процесі окислення виворітяться Cl, не дозволяючи муркати Me сильно ругатися.

Технології виготовлення інтегральних схем, - необхідно мати пластину монокристал. леговано-го кремнію; конц. P-доп $< 10^{15} - 10^{16}$

Сировина для виготовл. кремнію - кварцовий пісок без L-домішок.

1) У вб з SiO_2 отримати Si треба очистити його Me, який має більшу енергію зв'язку з киснем.



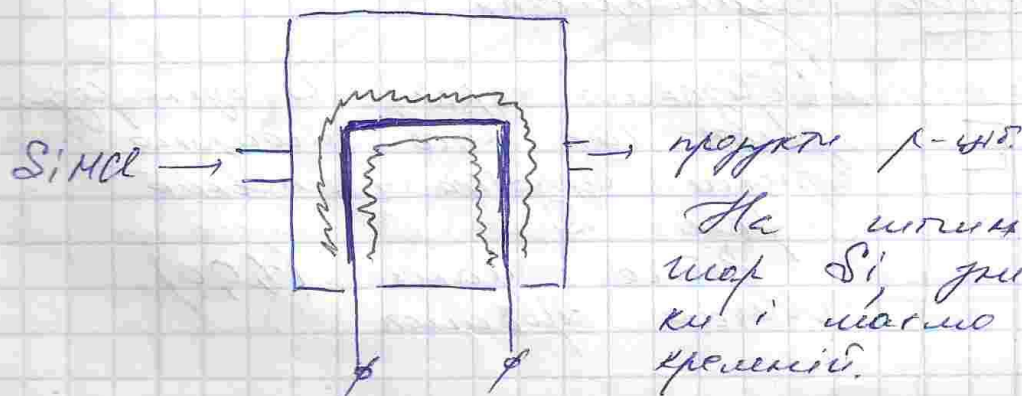
В ел. дуговій печі суміш SiO_2 та коксу (C) при високих температурах вступоводять і отримують Si 98%

Силіцій - аномальний в якому знах. до 70% Si

2) $Si + MCl \xrightarrow{T} SiMCl_3 + H_2 \uparrow$ - переведення кремнію в газову фазу

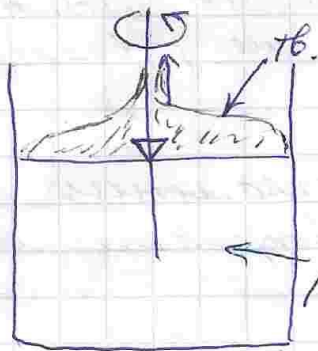
$$T_{\text{кип}}(SiMCl_3) = 34^\circ C$$

В замкненому об'ємі П-профілю шпильки кремнію, яка нагріє до температури.



На шпильці наростає шар Si, знімаючи її шпильки і маємо полікристалічний кремній.

Заправка у вел посудину заклад Si і плавить.
Пуди вставляють монокристалічну заправку



Заправка обертатся і підігрівають, де наростає монокристал до того часу поки воно не стане розмірів посудини.

Кристали це методом Чохральського отримують
Таким ж чином

Концентрація домішок в ТВ і рідкій фазі різна.
Віднош. к-сті домішок у ТВ і рідкій фазі
має сезонація - відокремлення

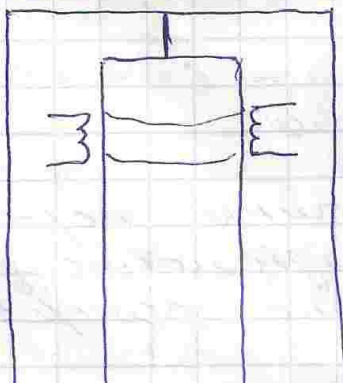
	Al	Fe	Sb	P	As	C	O	B
ТВ	10^{-3}	10^{-5}	10^{-2}	0,3	0,3	0,8	0,82	0,83
р								

коэф. сезонації

Проблема з C та O. Коэф. сезонації бл. 1, тому в ТВ і рідкій фазі концентр. домішок буде \approx однакова.

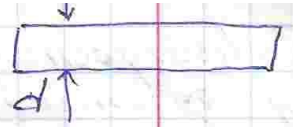
Епітаксія

Зонна плавка. Численні монокристали закріплюють і за допомогою великої індукції плавлять тонкі шари кремнію. \updownarrow декілька разів. Домішки переходять в рідку фазу, яка спливає до країв і мають густий монокристал.



Обрізали край, а було розділяють так, щоб площина пластини врівноважу певний час Si.
Робота чашки (1,00)
Механ. оброблення

Тверді пластини в які $\Delta d < 10 \text{ нм}$.
 Δd - функтуальне товщини.



Отримання тонких плівок на поверхні приладів мікро та напoeлектроніки

Першим способом отримання тонких плівок - кубання.

Способи одержання тонких плівок

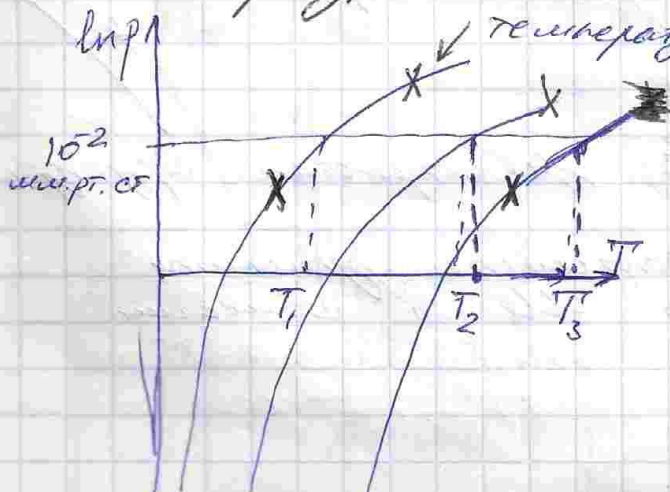
- спосіб переведення матеріалу, що осаджується в вакуумі, газу, фазу, річку, фазу, тв. фазу.
- проста конденсація, хм. р-ція, електрохм. р-ція.
- різні механізми переносу: дифузії в газі, рідині, вільний проліт.

Найконтрольованішим середовищем є вакуум.
 Це високоступінь контрольоване газове середовище.

З фізичної точки розподілення, термічне випаровування, електромагнітне, лазерне випаровування, іонно-промене-ве (катодне (магнетронне) розподілення).

Методи хм. розподілення засновані на хм. р-ції: осад з газу, фазу, річку, епітаксія, електрохм. розподілення, проліт.

Термічне випаровування є рахунок температурно-го нагріву.



температура підвищення р-ти
 При високій температурі випаровування, що дозволяє придати для термічного способу?

$$p_{\text{vap}} = - \frac{A}{T} + C$$

Ф-ла, що описує термічне випаровування

Найпростіший рідстивний напорошувач - дріт з
 з титанового Me (W, Mo), куди вклядається
 роговина, яку треба напорошити. Переворну в руку

A

фазу, а потім випарувати. Тут важко оптимізувати
 швидкість півку до шв. напорошення мена.
 у вакуумі наслідують димшково газ.

Залежність густоти півку в шв напорошення

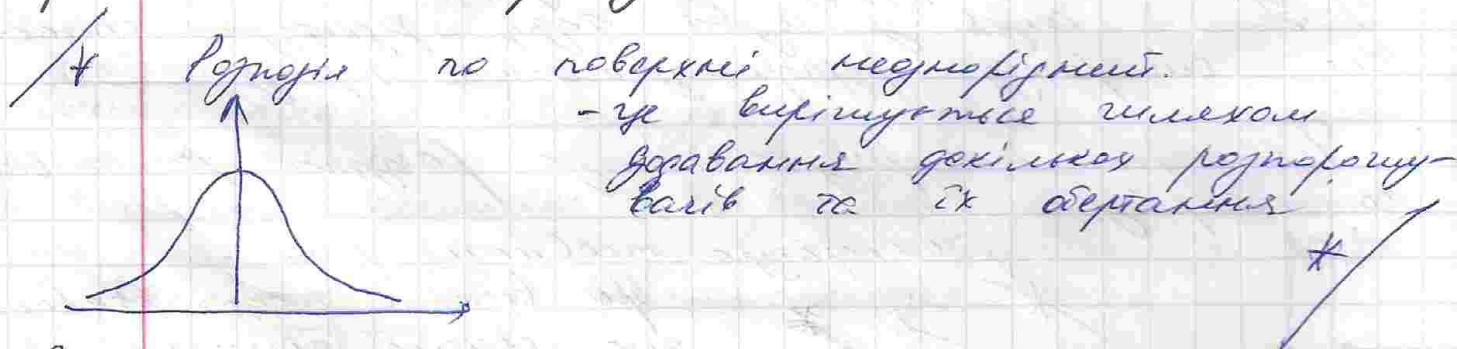
Півку повинні бути необхідної стехіометрії
 Метрики: 1) В розташованій фазі Me вклядається з матері-
 алом дріт

6.10.2015

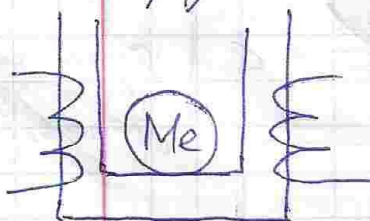
2) Не в метал можна напорошити та-
 ким методом

Стехіометричний опови так не можна напорошити, бо
 буде сильна втрата роговини з матеріалом
 напорошувача

Як робити стехіометричну півку методом
 крайнього напорошення

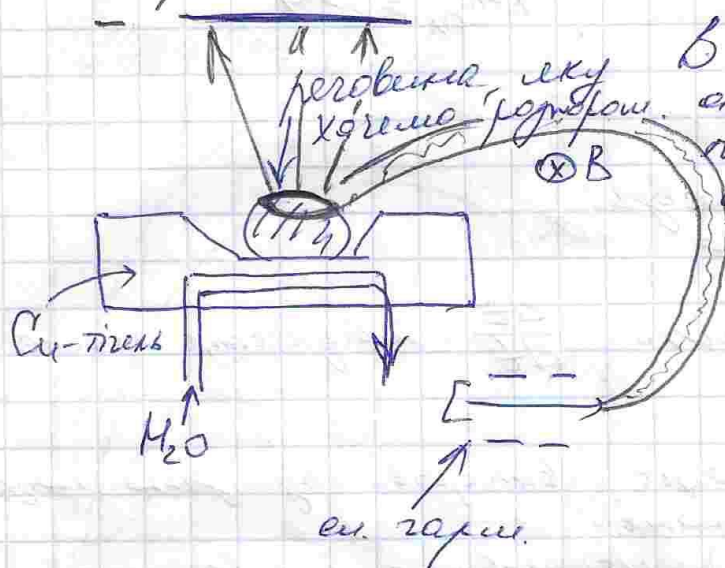


ВН-має високу $T_m \approx 2500^\circ\text{C}$, дрібнокристал. структуру
 не абсорбує.



Намко розпалює дріт і стінками
 вклядається Me з стінками

Електроно-променеве моношення



В цей час запускаємо вогонь електронів. Ел. горюча вел. $I_{гор} \approx 0,5 \text{ А}$, $U \approx 10 \text{ кВ}$ спрямована в сторону. Фокусований пучок ел. попадає на поверхню матеріалу, який ми хочемо розгоріти \rightarrow розплавлення і випаровує. Для рівномірного моношення обертаємо реторку.

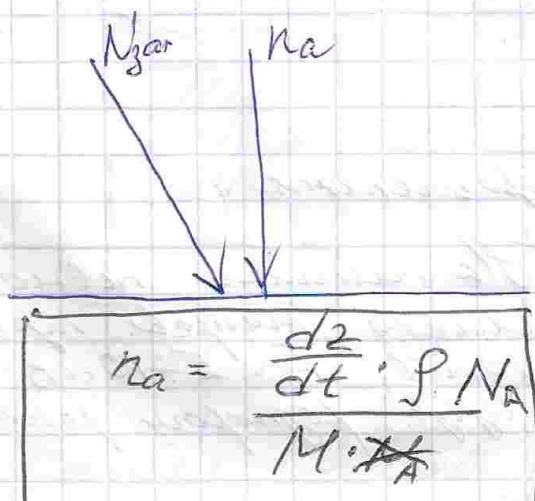
Шв. монош. при $\frac{\Delta z}{\Delta t} \sim 5 \text{ мм/с}$

Ел./променеве монош. $\frac{\Delta z}{\Delta t} \sim 20 \div 30 \text{ мм/с}$
В процесі випаров. можуть утворити не тільки іони атомів, але й іонів, які можна зводити з великою користю.

Аргенту (припаяння) можна забезп.

- нагрівають перклади
- пелет "-" на підкладку вартості можна 10 пелет \Rightarrow збільш. швидк. проникнення

У вакуумі поверхня всеодно забруднюється за допомогою іонів. Високий вакуум спричиняє високу вартість \Rightarrow не вигідно, краще збільшити $\frac{\Delta z}{\Delta t}$



При малес на поверхню реторки матимемо 2 конур. потоки:

- n_a - потік атомів з ф.
- іонізованих газів

$$N_{gar} \ll n_a$$

довести що ф. му,
M - молярна маса
 ρ - густина ф. му
 $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

$$N_{\text{Зал}} = \frac{P}{\sqrt{2\pi M_{\text{Зал}} \cdot kT}}$$

$$N_{\text{Зал}} = 29$$

$$N_{\text{Зал}} = \frac{n \bar{v}}{4}$$

Удоб. кінетична теорія:
 - $\downarrow N_{\text{Зал}} \rightarrow \downarrow P$ - розрід
 - $\uparrow n \rightarrow \downarrow M$ - розрід

Фізичні мех.: збільшити $\frac{dz}{dt}$ - швидкість напору
 або зменшити вакуум

Лазерна абляція - процес випаров. під дією потужного лазерного випромінювання.

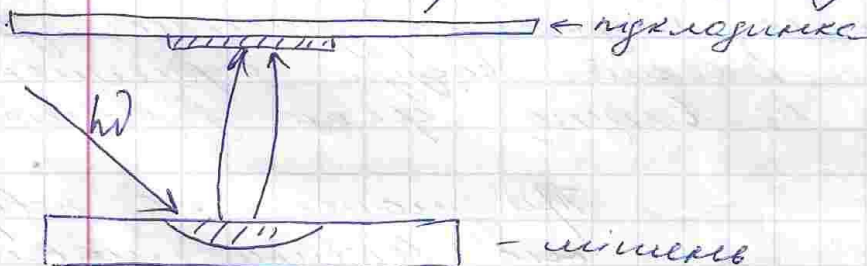
- (температура роботи) мезурована робочістю
- висока температура

$\Gamma \sim 10 \text{ нм}$ товщина півки $d \sim 10-20 \text{ нм}$

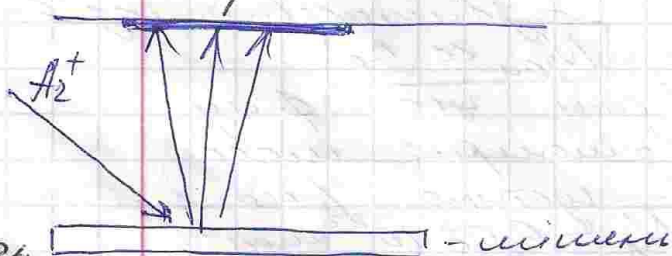
$$\frac{dz}{dt} \sim 1 \text{ мкм/с}$$

Літотехніка в ЛМД - висока к-сть швидких іонів, можуть руйнувати пухляк. ~~Але~~ на Але - можна морозити в середньому вакуумі

- стерильність в чистому шари зберігання:



Іонне / молекулярне морозіння



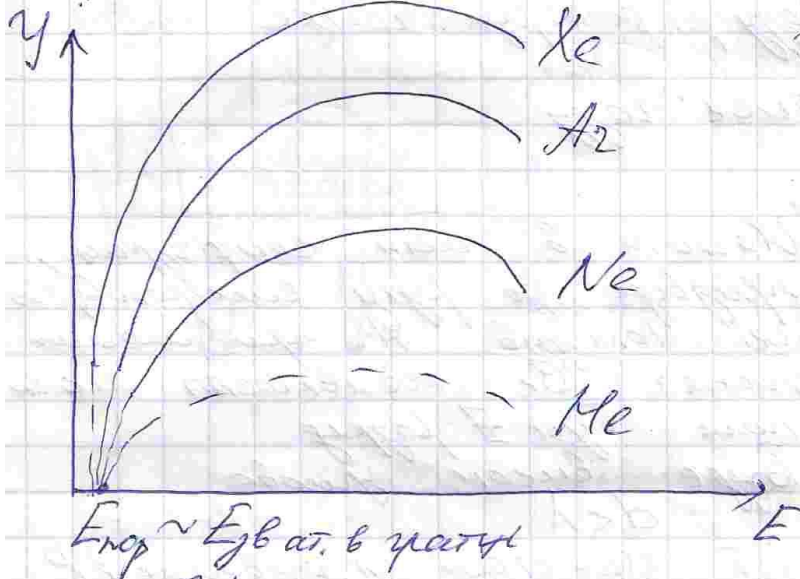
На літотех. лівую сторону морозити. тиск іонів $E \sim 5-10 \text{ кев}$, вібрув. розторос. ретовини

Коеф. іонного розпоромі

$$\gamma = 1 \div 10$$

$$\gamma = \frac{N_{\text{розр}}}{N_{\text{іон}}}$$

к-сть атомів
мігнень на
вибув. і іонів



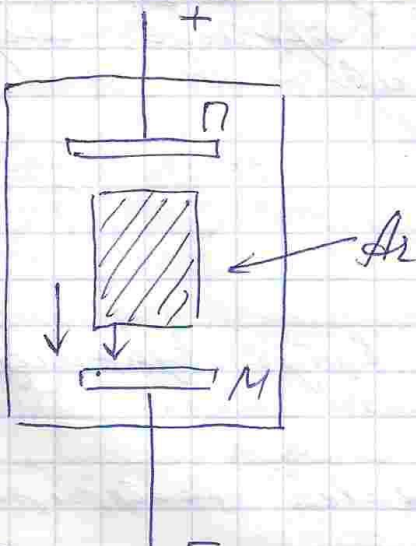
$m_{\text{іон}} > \text{маса інертного газу}$
 $m_{\text{іон}} > \gamma$

Найкраще відбув. за рахунок потрапилих порогових в шийний матеріал

$$\frac{\gamma_{\text{Ва}}}{\gamma_{\text{Аз}}} \approx \frac{1}{6} \text{ в узьому інтервалі енергій}$$

- 1) Іони вибітаються в білої кількості і поверх не за рахунок малого розпором. Ва перетворюється у ВаАз на ВаАз. Згодом за рах. малого коеф. розпором. поглине випаровується ВаАз і поглине осідає на поверхні ВаАз.

Детальні мехр. мехр. мехр.



Між підкладкою і шийною, поміня в певний об'єм запускання інертного газу і до ПТА М приклад. велику різницю потенціалів
 \Rightarrow запал. тліючий розряд
 \Rightarrow катодовий стовп \Rightarrow потрапляє іони на М \Rightarrow вибув. електронів з катоду (М) \Rightarrow потрапили на підкладку і при високих $P(\text{Ar})$ тліє

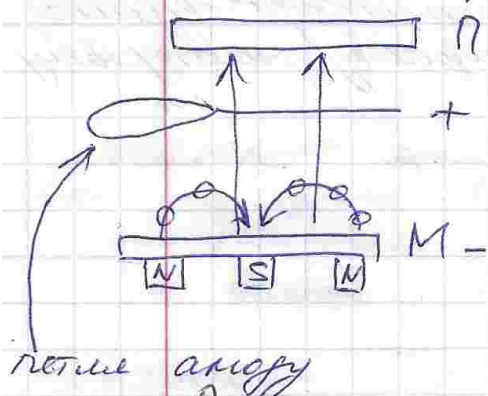
Нерозік: тліючий розряд

Умова безперешкодного перенесення: $d < \lambda$
 розмір с-ш $<$ довжини вільного пробігу електронів

σ - діаметр атома газу, λ - довж. вільного пробігу електронів

$$\lambda \sim \frac{1}{\sigma P}; \quad P - \text{тиск газу}$$

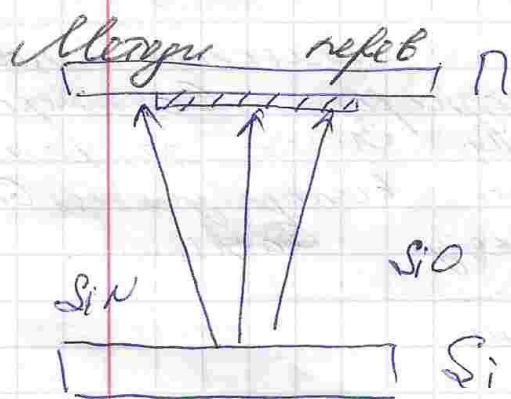
Магнетронне розпорошення



Магніт в такій конфігурації призведе до руху електронів по циклоотраєч. іонізов. Ar при малих тисках. Зв. наявності магн. поля буде λ розрив буде висок. умова $d < \lambda$

Зв. траєкторії ел. дозволяє λP

Активне іонне розпорошення



В атмосферу крім Ar додають O_2 або N_2 . Атоми Si втрачають λ замикаються газом, тв. тех розпорошен. Si. SiO досягає підкладки і розкладається до SiO_2 . Дозволяє отримувати шари діелектриків

Si_3N_4 - нітрид
 SiO_2 - оксид

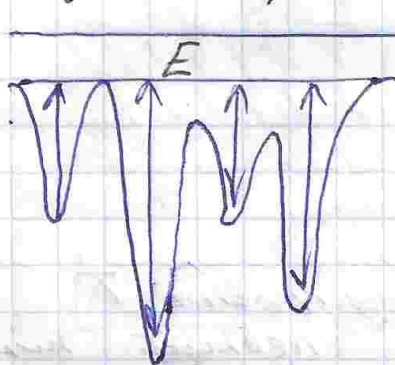
13.10.2015р.

Щоб утв. нова фаза, механ. щоб відбув. взаємодія між поверхнями.

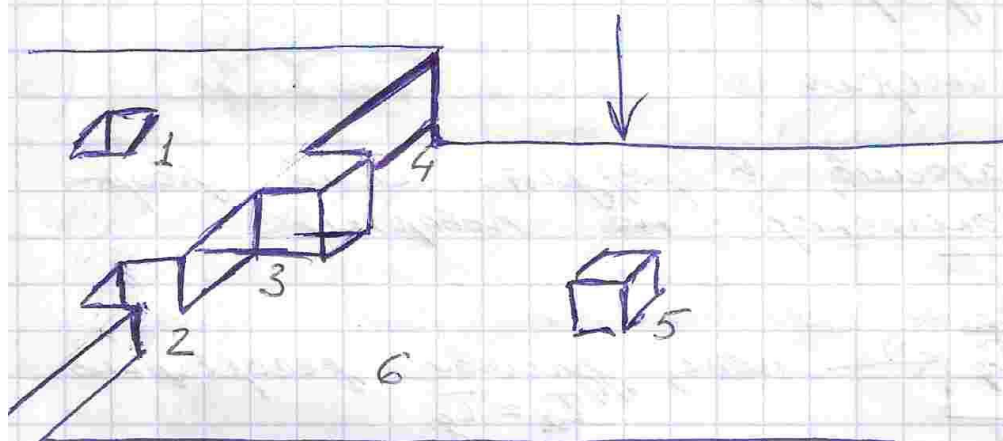
Щоб це сталося потрібна енергія механ. щоб $KT < E$ взаємодія ван-дер-Ваальса

Цей п-с - конформація, що зумов. адсорбцією. Можливо лише при малих T .

Звідси береться ця енергія взаємодії:



2 можливості появи різних дефектів упаковки



Атоми у вигляд кубиків + дефект упаковки

Найб. енергія зв'язку буде у вигляді найб. координац. числа (к-сті сусідів)

Час життя до десорбції

Час життя атома, що прибув на поверхню в хаотичному

$$\tau = \tau_0 e^{E_a/kT}$$

E_a - енергія, що виступає при адсорбції

Час життя атома в певному мінімумі потенціалу

$$\tau_m = \tau_0 e^{E_m/kT}$$

$\tau_0 \approx$ періоду колиб. крист. ґратки

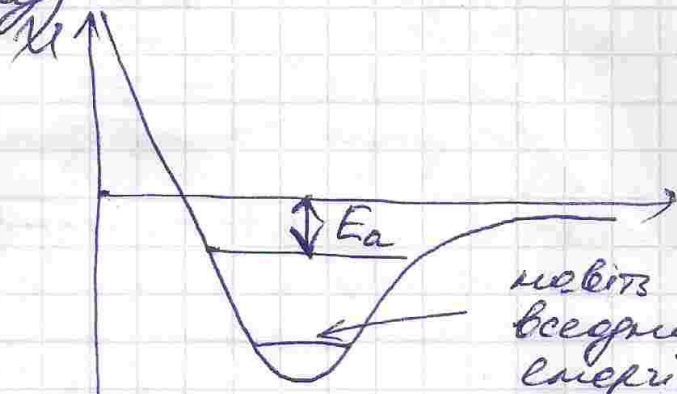
E_m - енергія міграції, яку неох. додати, щоб покласти атом

$$\tau_0 \approx 10^{-13} \div 10^{-14} \text{ с}$$



$$E_a > E_m$$

2) \exists поверхнева дифузія / міграція атомів по поверхні, т.б. переміст. з дрітної поверхні в



новітз при нульових T всеодно буде певний мік. енергій.

Щоб збільшити \tilde{E}_m треба $\uparrow T$, але обережно, щоб не почалась десорбція

E_m - середня енергія

Розм. потік атомів в режимі його утвор. рівноважна концентр. на поверхні

$$\frac{dn_a}{dt} = N_a - \frac{n_a}{\tau_d}$$

← потік, зумовл. десорбцією $E_a = E_d$

N_a - потік ат. на поверхню
Розв'язок цього р-ня буде

$$n_a(t) = N_a \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

при $t \gg \tau$

$$n_a(t) = N_a \cdot \tau_d = N_a \cdot \tau_0 e^{\frac{E_d}{kT}}$$

- концентр. вуглевод. високим T

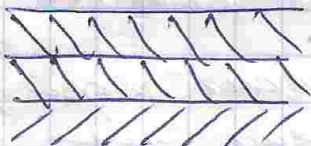
при $t \ll \tau$

$n_a(t) = N_a \cdot t$ - немає десорбції, все, що прибуло на поверхню, залиш. на ній.



Зростання півки
Нотк осірає на поверхню.

1) Механізм пошарового зростання

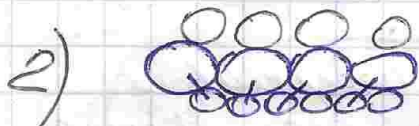


Механізм Франко-Вандер Мерте

іф с-ма гетерогенна, суттєва
умова зрост. за пошаровим механізмом:

$$\frac{|a_s - a_{ss}|}{a_s} < 3\% - \text{неупрощ. сталих уаток}$$

a_s - стала уатки підмагички
 a_{ss} - асорбату



не ат. з малим d зрост.

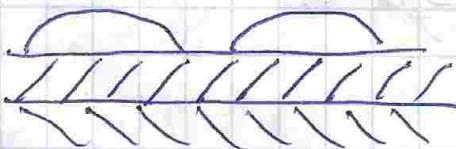
ат. з великим d

Зв'язки приу. до утвор. дислокацій \Rightarrow зростання
взрив за механізмом

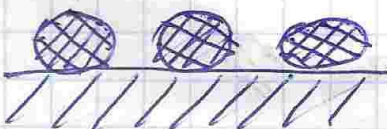
1) утвор. напруж. моношар за умови

$$\frac{|a_s - a_{ss}|}{a_s} > 3\%$$

2) зрост. взрив по острівцевому механізму
або острів. на змученому моношарі
або 3Φ або механ. Странські-Крестанова



3)



3Φ механізм
механізм Волмер-Вебера
острівцевий

Як і термодин. точки зору опис. п-е зростання
За рах. конденсації вільн. енергії утвор. об'єкту

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v$$

$$\Delta G_v = - \frac{kT}{\Omega} \left(\ln \frac{P}{P_H} + 4 \pi r^2 \sigma \right)$$

поверхня пересичення

Ω - атомний об'єм

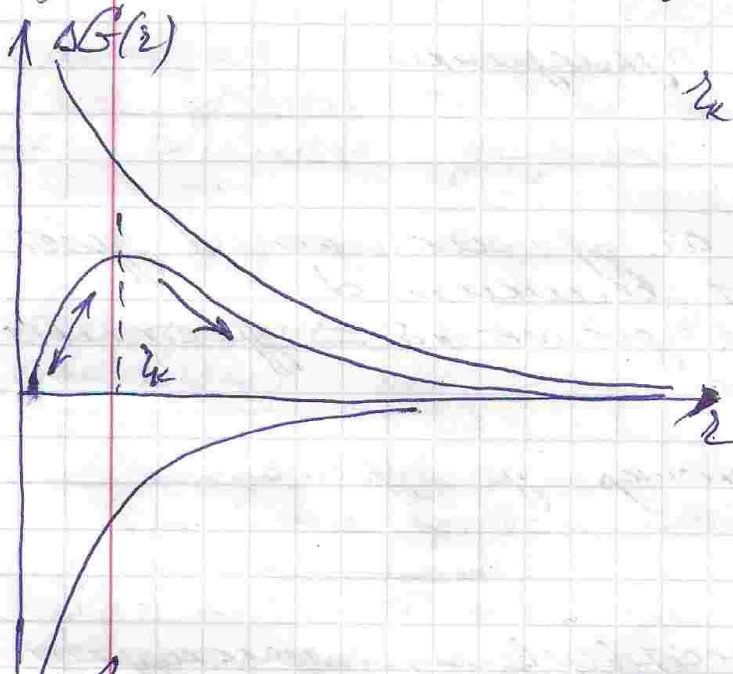
P - тиск масл. пари речов.

P_H - тиск масл. пари при

Т кипіння

$\uparrow E$ за рах.

зменш. повної енергії за рах. конденсації

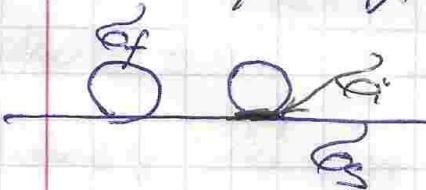


$$r_k = \frac{2\sigma\Omega}{kT \ln \frac{P}{P_H}}$$

σ - коэф. поверхневої енергії металу або вільної енергії

Розр. ситуац., коли вільна енергія нуклеації

σ_s , σ_i - інтерфейсу, σ_f - плівки

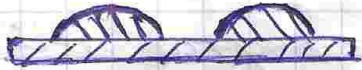


$$\sigma_s < \sigma_f + \sigma_i$$

Осередок буде таким малим, що залишат. певну обл. поверхні виступу.

$\sigma_s > \sigma_f + \sigma_i$ - \uparrow плівки залишат. σ_f
а) епітаксії

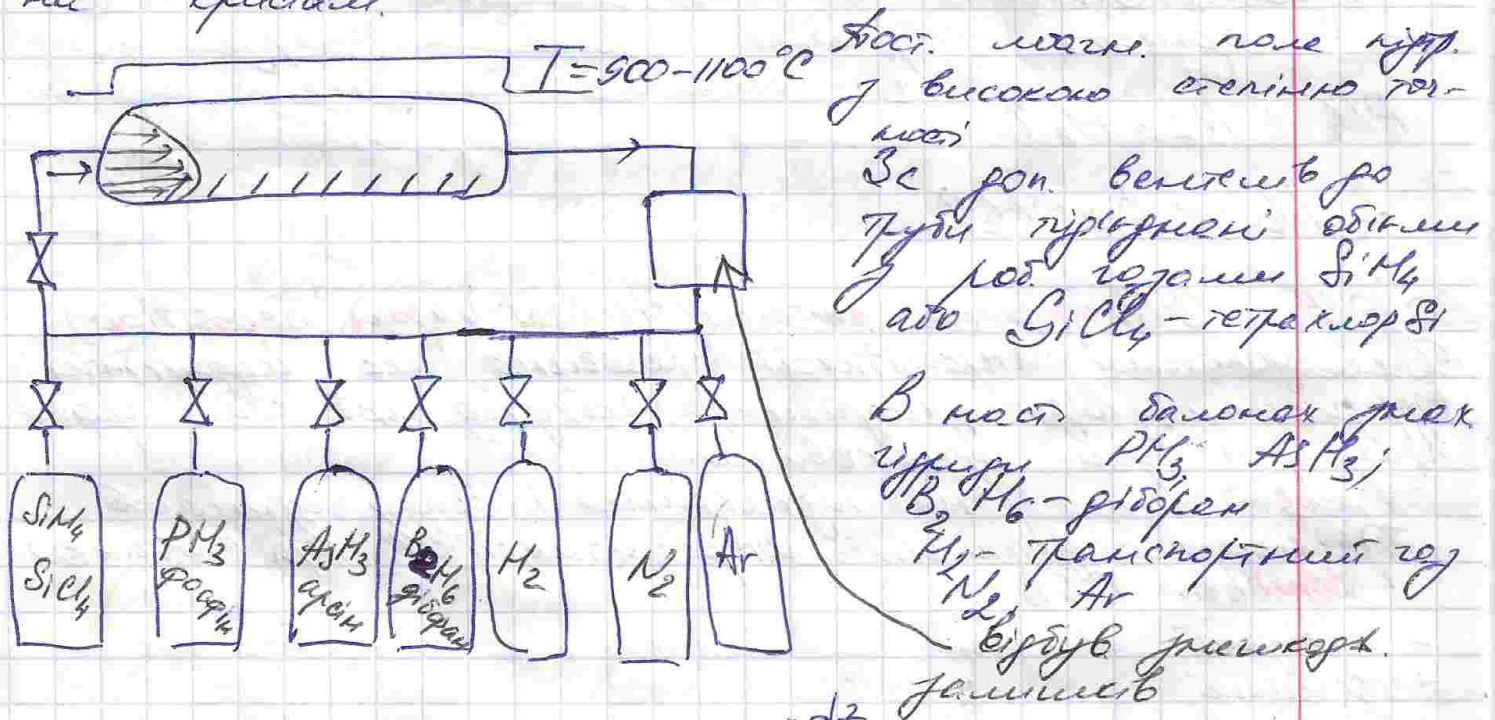
б) газові поверхні термично утворені монослоями, а залізо-основні / епітакс. рост, на залізній базі сталей цукот



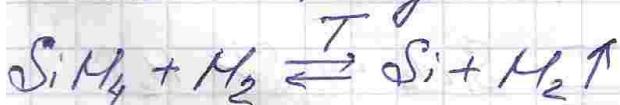
Сурфактанти — поверхнево-активні речовини. Змінюють поверхневий натяг (З.В. мило), фіз. власт. речовини.

Хімічні методи осадження

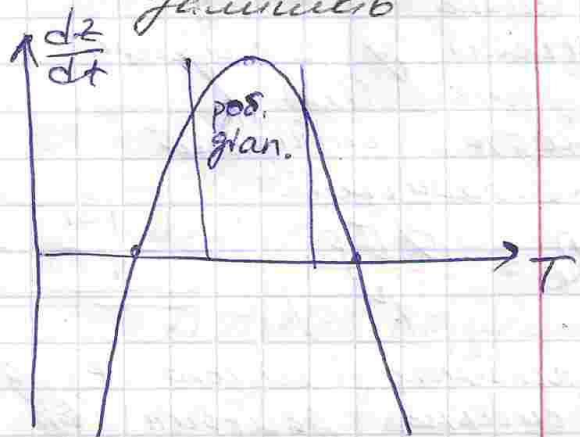
Газофазна епітаксія
Вироб. одразу після отримання штих пластин на кристалах.



Зам. шв. ↑ втр. T:



Темп. має бути мінімальною



Транспорт реагентів має бути дифузійним.

$$Re = \frac{\rho v r}{\mu} - \text{число Рейнольдса}$$

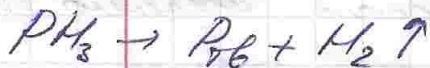
$Re < 40$, щоб точно було ламінарна течія

D - діаметр
 v - шв. руху
 ρ - щільність, тиск газу
 μ - в'язкість

Чим r менше, тим більше $\frac{dz}{dt} \approx 0,1 - 2 \text{ мкм/хв}$

Недоліки газо-фазної епітаксії

- нееконотичність
- складність створення $\frac{\rho}{\mu}$ метру



20.10.15 CVD-технологія епітаксії (chemical vapour deposition)

Для утворення ітеросітаксії (пероїна, яка осаджується, вкривається від підкладки) необхідно, щоб стали чисті і чисті р-ми були окислювальними

Термічна епітаксія - р-ми підкладки і осадку адгезивні

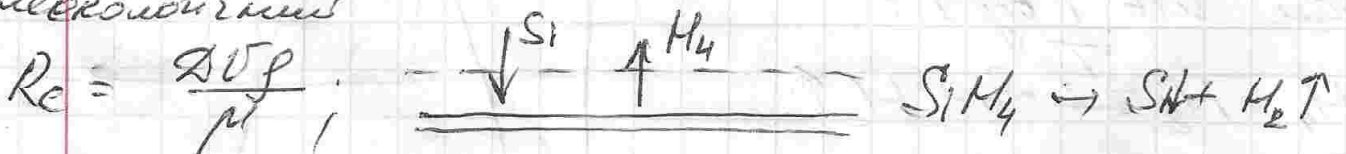
Прикладом устійливої ітеросітаксії є K_2O епітаксія.

Довідка CVD

- швидкий
- дешевий
- легкий у реалізації

Недоліки CVD

- часто швидкий
- нееконотичний



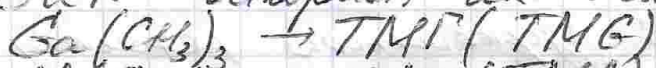
- р-ми ітерація сильно \propto дифузії $D \sim T^n$
- сильно залежить від температури

Для з'ясування того, наскільки можна знизити тиск, $P = \text{const}$ а потім з'ясувати, що дозволить змінювати склад газу і вивести структури з різними властивостями.

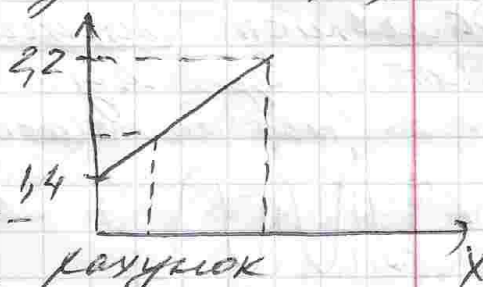
Такі структури виводяться у реакторах з низьким тиском. **MO CVD**
metal organic

$A_3 B_5$ - напівпровідники; GaAs, InP, GaP, AlAs, GaN - використовують у MOCVD

GaN - використовують як діодний матеріал у сплавках



ΔE - заборонена зона, її ширину можна змінювати за рахунок концентрації примісних $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$.
Для методу MOCVD потрібні високі T



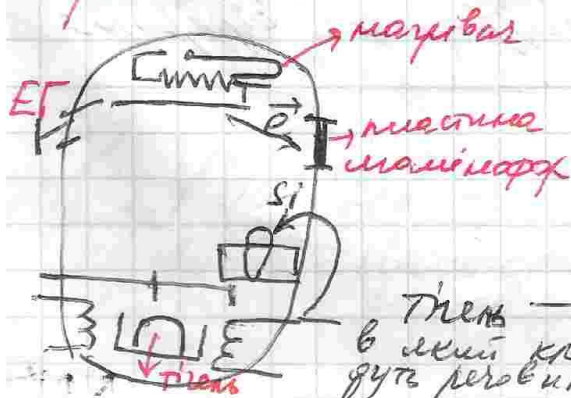
$\text{SiH}_4 \rightleftharpoons \text{Si} \downarrow + \text{H}_2 \uparrow$ - може відбуватися зворотне р-ння за рахунок високих T на поверхні пластини



Високі T зрушують рівновагу структури на мотівну згустію, тому цей метод має бути керуваний.

MOCVD має низький рівень контролюваності, можна контролювати лише P, T, V . Найкраще контролюється середовищем в вакуумі.

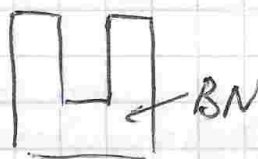
MBE - molecular beam epitaxy. Молекулярно-променева епітаксія



$$P \approx 10^{-10} - 10^{-12} \text{ Torr}$$

$$T = 1700 - 900^\circ \text{C}$$

Стиснуто $A_3 B_5$



В тілі полімерів
 As, Ga, Al, ...
 $\Delta T_{\text{пл}} = \pm 0,5^\circ \text{C}$

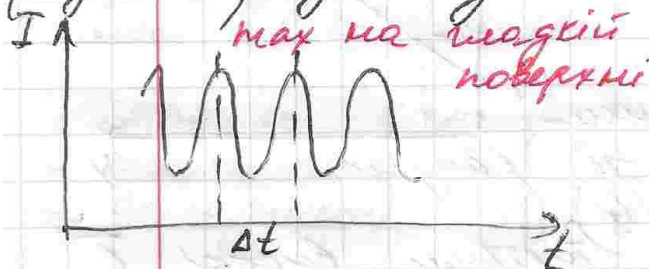
Над тімпами в засівки, які їх вухривають або закривають

Велика термія контролю

$\frac{\Delta Z}{\Delta t} < 10 \text{ км/хв}$ - мурка шв, але висока термія частин, монотонно

В камері можна розмістити датчики (Диф. пов. \bar{E} , дф. шв. \bar{E} на вібриті і т.д.)

Залежність інтенсивності звукової ретини (вібриті) від часу:



Δt дов. вимірювання шв. вимірюв. і монотонно

Si у такій с-мі наносити електронно-променевий випробування, що вимі-

рюють як домішку $A_3 B_5$ н/н

Переван:

- розподілення
- мистота
- мєрвисока T
- еволюційність

Переліки:

- дуже гарний
- дуже повільний

Таким методом можна створ. маркисонгастоти транзистори.

Метод камерування маркисонгастоти вухрило у 60-х рр.

Гірану - іонізаційна при високій температурі

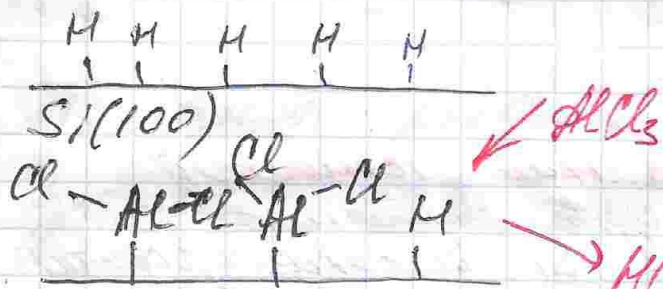
27.10.2015



Атомно-шарова епітаксія

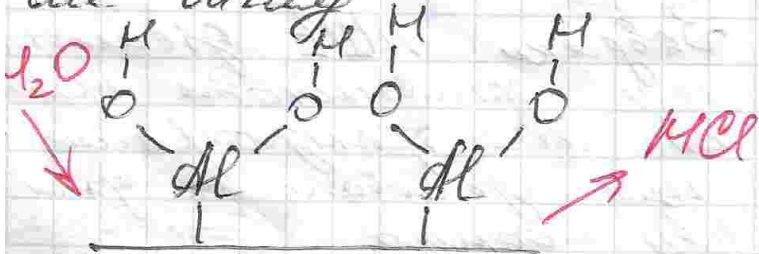
А-с випилює скл. з 2-х металевих пластів асорбовано. Препарати AlCl_3 і H_2O .

if їх змішати при високій T то починає утворюватися H_2O . Як правило, до утв. полікристалічної плівки і мішатимуть контроль над таким п-ком.



На поверхню Si (обрізані зв'язки) маскують H_2 інакше випилює в атом. вузлі. Протягом певного часу А-с саморегулюється. На цю структуру осаджують AlCl_3 , що вступить у реакцію з H_2 утв. HCl . Як тільки р-ція пройшла, п-с зупинився.

Забудовується реакція камери AlCl_3 і рідкого H_2O . H_2O вступить у асорбовані шаром і знову утворює HCl . До вбудовування моменту поки всі поверхні не приймуть вигляду.



Метод знову напускає AlCl_3 і на шарок п-с знову, що і вийде скляне.

В результаті отримують майже ідеальний шар SiO_2 . А-с найбільш контрольований. **Зростає** простота генерування. Широко почав використовуватися тільки в 2008/35.

Цим методом Intel намагається підготувати шар.

Також ув. у виготовленні конденсаторів для RAM. (Random access memory).

Висновок:

Підсумок:

- 1) АШЕ-метод намагається тонких шарів на різних поверхнях з точністю на нанометри.
- 2) Близький до методу розфарбовування емтасей, але АШЕ сам себе зображує, а для прекурсора розкладає в газі.

Недоліки:

- дуже повільний

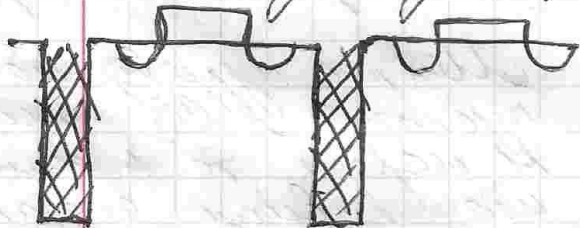
Електролики в інтегральній технології

Отримання шарів оксидів кремнію

Завдяки шарам оксидів Si можна робити майже мікрошари в інтегр. схемах.

Найважливіше для інтегр. схем:

- між металізацією
- між елементами (ізоляція між окремими транз.)
- під затворами
- посилання (захист від зовн. шумів)
- на підкладках (фотографіе)



Завдяки АШЕ електролики заповнюють проміжки між транзисторами, щоб ізолювати їх один від одного.

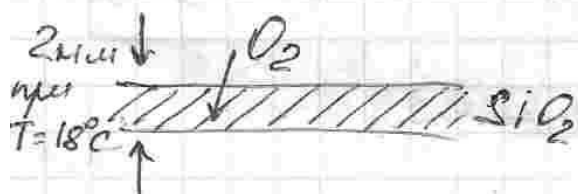
- RHI - кремнієв на ізоляторі (SOI silicon on Insulator)



Шар SiO_2 на пластині, така ж пластинка SiO_2 прилипає до шару оксиду на SiO_2 і далі одну за одну пластинки піднімають піднімаючи до того часу поки на поверхні не залишиться шар Si



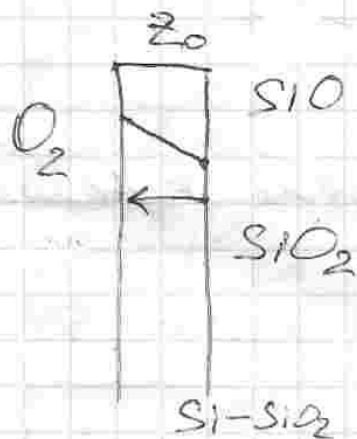
Процес затратний.



O_2 окислює вуглець до верхнього шару. Це не відбувається при високій температурі.

Не відбувається рівноваги: H_2 , O_2 , Ti

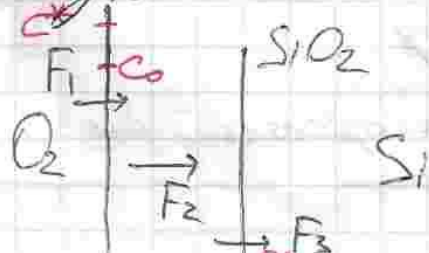
Рівновага серед окислювача зумовлена зарядом компенсації.



При русі атомів до поверхні оксид утворюється на поверхні.

В Si оксиді відбувається рух до SiO_2 до Si і в обидва напрями.

Окислювачі, зокрема O_2 , мають певний шар, а потім відбувається зворотний шар.



$$F_1 = h(C^* - C_0)$$

h - деяка константа

$$F_2 = -D \frac{dc}{dz} = \frac{D(C_0 - C_i)}{z_0}$$

D - коеф. дифузії; перший закон Фіка

$$F_3 = kC_i - \text{за зак. протікання р-чнї}$$

k - константа шв. реакції
Між розриву р-чн. впливину і туди протікає шв. окислу

$F_1 = F_2 = F_3$ - в шв. окислу немає ні зворотних потоків окислу.

F_3 = визнач. шв. руху потоків впливину.

$$F_3 = N_i \frac{dz_0}{dt}$$

N_i - концентр. поверхні окислу в 1 одиниці окислу
Можна контролювати; $T, P(O_2), t$.

z_0 - товщина

$$z_0 = f(T, P, t) (*)$$

Але і Травє запропонував моделі в рамках якої визначити залежність (*)

$$F_3 = kC_i = \frac{kC^*}{1 + \frac{k}{h} + \frac{kz_0}{D}} = N_i \frac{dz_0}{dt}$$

$$N_i \int_{z_i}^{z_0} \left(1 + \frac{k}{h} + \frac{kz_0}{D}\right) dz_0 = kC^* \int_0^t dt$$

$z_i = z_{\text{min}}$ - поз. товщина окислу

T - час за який шв. z_i зростає до

$$z_0^2 + Az_0 = B(t + \tau)$$

$$A = 2D \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{h} \right) \approx \frac{2D}{k}$$

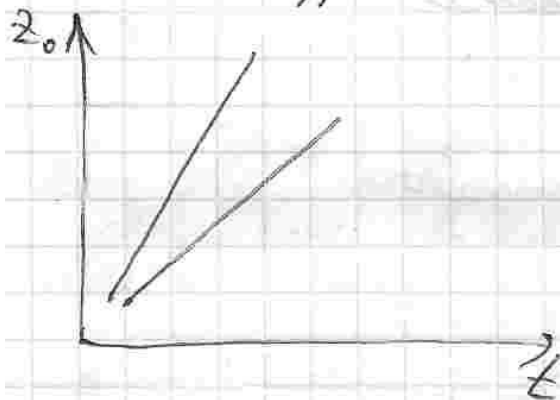
$$B = \frac{2DC^*}{N_i}$$

$$\tau = \frac{z_i^2 + Az_i}{B}$$

1) Випадок малих часів (поверхнева швидкість окиснення)

$$(t + \tau) \ll \frac{A^2}{4B}$$

$$z_0 \approx \frac{B}{A}(t + \tau) = \frac{kC^*}{N_i}(t + \tau) - \text{ліній. залеж. від часу}$$



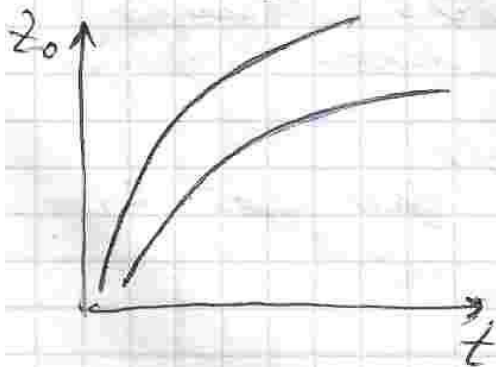
термінометри: концентрація і тиск
термінометр - параметр, що
найбільше впливає на
швидкість реакції.

C^* - фактично тиск газу в
газовій фазі.

2) $t \gg \tau$, $t \gg \frac{A^2}{4B}$

$$z_0 = (Bt)^{1/2} = \left(\frac{2DC^*}{N_i} t \right)^{1/2}$$

Обмежуючим термінометром буде дифузія



Наступною разу К.Р.

2 теор. питання
та задачі

10.11.15

Легування

Використання колив. треба отримувати певну концентрацію легуючого домішки у н/п

- локальне
- нелокальне

- 1) Кордонування концентр. легуючого домішки
- 2) застос. однорідного розподілу домішок
Тільки лів. областями легуючих домішок
має бути мизьким (вудомним)
- 3) мизькі бути встановлюються
- 4) швидкими.

Методи легування

- 1) дифузійне легув.
- 2) іонна імплантація
- радіаційне

Метод радіац. легування

3% $^{30}_{14}\text{Si}$ - ізотоп кремнію



Небезпека: однорідний розподіл домішок, бо дов. великою протіку нейтронів в велика, переріз з ядрами мизька, також неможливо

Недоліки: наявність лед. реактора
нвмий час впливання булі, щоб вуд-
бувся розподіл (кілька годин)

Дифузійне легування

Використ.

- 1) у формуванні Б і Е областей у біполярних
технологіях

3) В сочеленной энергет? для получ. поликристал.
кремния

1) Диффузия в жидкостях, твердых телах, пористых материалах, пористых телах при высоких температурах

Тв. фосфор жарновс. влает
 Si
 $SiO_2 \ll Si$



З) Дифузії вуглевод. при нормалі тиску-мелова-
них поверхонь. Н-с вуглевод. в невеликому
реакторі з тиском мелового розчинки і
транспортним газом (H_2) контролем триває
менше, ніж в газодній епітаксії

N-концентр. мур-
гоз роліоник

Контроль мощности



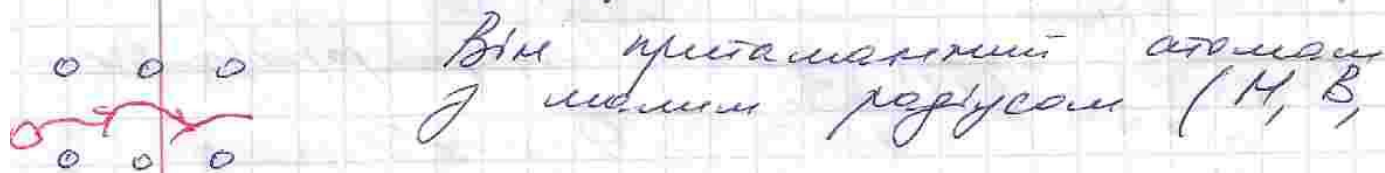
$N(x)$

x

Дифузія — перемос рівномірної швидкості молекул у напрямку зменшення концентрації з області з високою концентрацією в обл. з низкою концентрацією.

Коеф. дифузії залежить від механізму дифузії у тв. тілі дифузії:

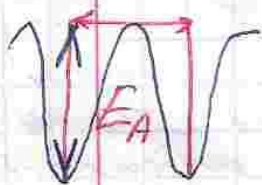
1) **мізвужова дифузія** — атоми дифузанта рух. по мізвужах,



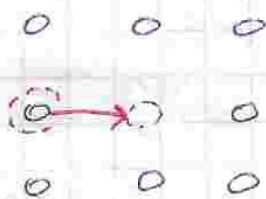
2) **вакансійний механізм** при високих темп. має характер відповідний атомам.

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad E_a - \text{енергія активації}$$

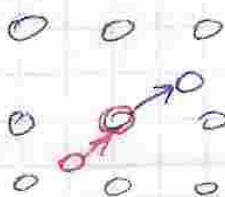
$\tau_0 \approx 10^{-13} \div 10^{-14}$ — час періоду колив. крист. ґратки



Ув. вакансії (точкові дефекти), мобільний вакансійний механізм



3) **скафетний механізм** Атом, що знах. у мізвужі виграє атом з вузла кристал. ґратки і замінює його.



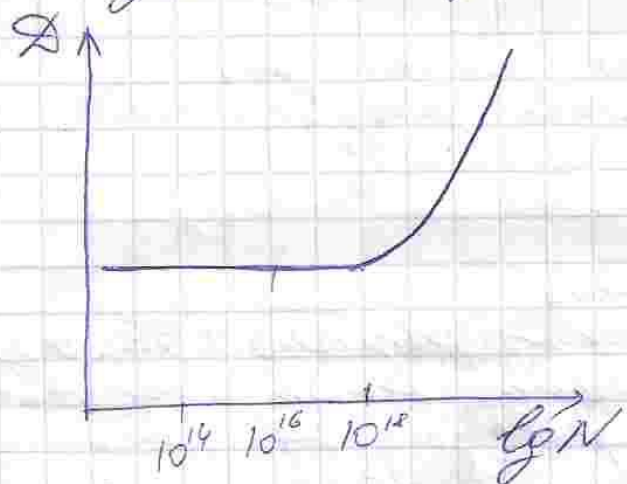
$$D_{\text{роз}} = \frac{1}{3} \frac{v^2}{\tau}; \quad \tau - \text{час між двома зіткненнями, мс.}$$

$$D_{\text{ТТ}} = L^2 \frac{a^2}{\tau} = D_0 e^{-E_a/kT} \quad - \text{коэф. дифузії у тв. тіл}$$

a - стала частоти
 $L \approx 1$

D залежить від N , упорядкованості кристалу.
 Більший в полікристалі, бо більше дефектів.

D залежить від концентр. певного роду дефектів.



Зростає дифузії
 внаслідок того, що
 збільшення
 дефектів \Rightarrow збільшення
 напруження, що сприяє
 більшій руху у кристаличній ґратці.

P -м. що описує дифузійно - p -м. Фіка

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad - \text{потік}$$

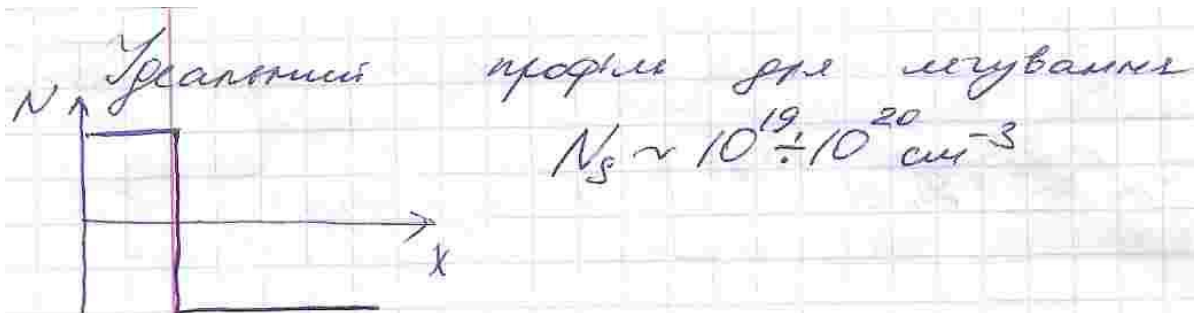
Вим. дифузійного коефіцієнта



$$d \ll L$$

$$2) \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad \text{при } D = \text{const}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$$



Концентрація легуючої речовини $N \leq N_s$

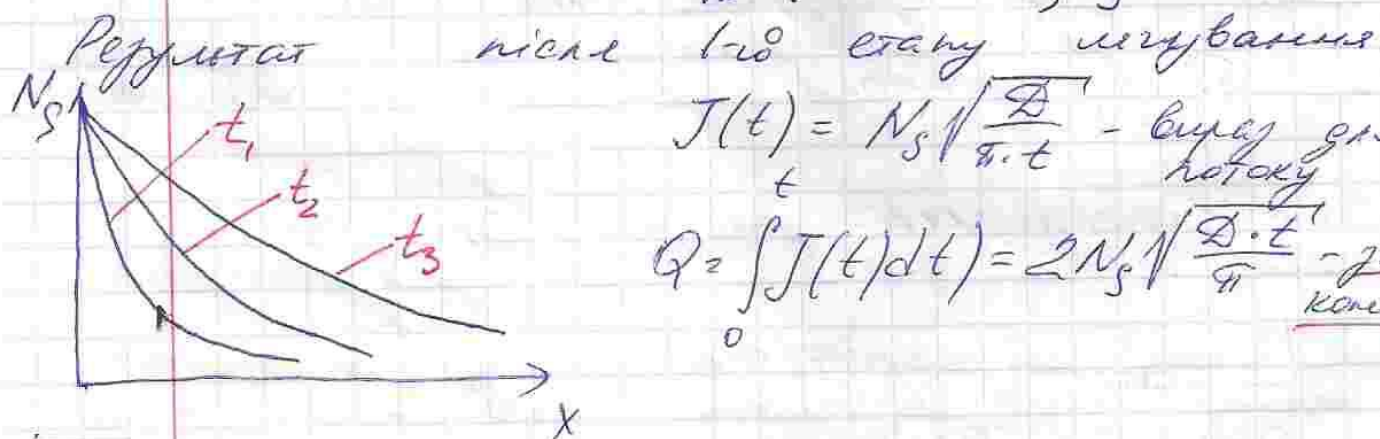
N_s - концентрація масивного легирувального речовини. Вихід легирувального речовини - включення нової фази.

- 1) $N(0, t) = N_s$
- 2) $N(\infty, t) = 0$
- 3) $N(x, 0) = 0$

кор. умови для
1-го дифузії

Дифузійне легування
1) Етап розгонки із масив. твердого речовини. Висхідна дифузійна концентрація.

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

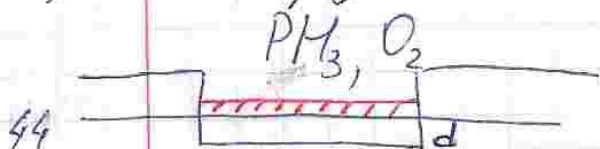


$$J(t) = N_s \sqrt{\frac{D}{\pi \cdot t}} - \text{вираз для потоку}$$

$$Q = \int_0^t J(t) dt = 2 N_s \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} - \text{заг. конц. реч.}$$

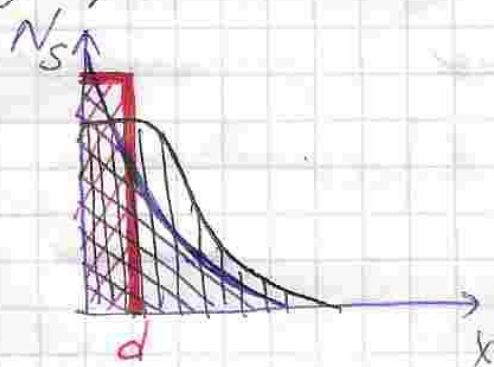
2) Етап розгонки (дифузії з об'ємною середою)

На поверхні осадок
кислот з речов. P (фосфор)



1. утв. шор силікатного скла \Rightarrow дифузійний процес.
 А дані змін. пор. і граничної умо-
 ви на шор процесу (об'ємне середнє)

Вважаємо, що в шор товщ. d у нас
 резерв. к-сть даних Q .



$$N(x, t) = N_s \quad 0 \leq x \leq d$$

$$N(x, t) = 0, \quad x > d$$

Аналіз рішення 2-го р-ня. Фікс

$$Q = N_s \cdot d$$

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D t}\right) - \text{гаусіан}$$

При заданій Q розподіл буде зміню-
 ватися. Але площа під граф. даним. незмін-
 ює.

Знаючи Q можна контролюв. к-сть реч. в кристалічних шарах.

Переваги:

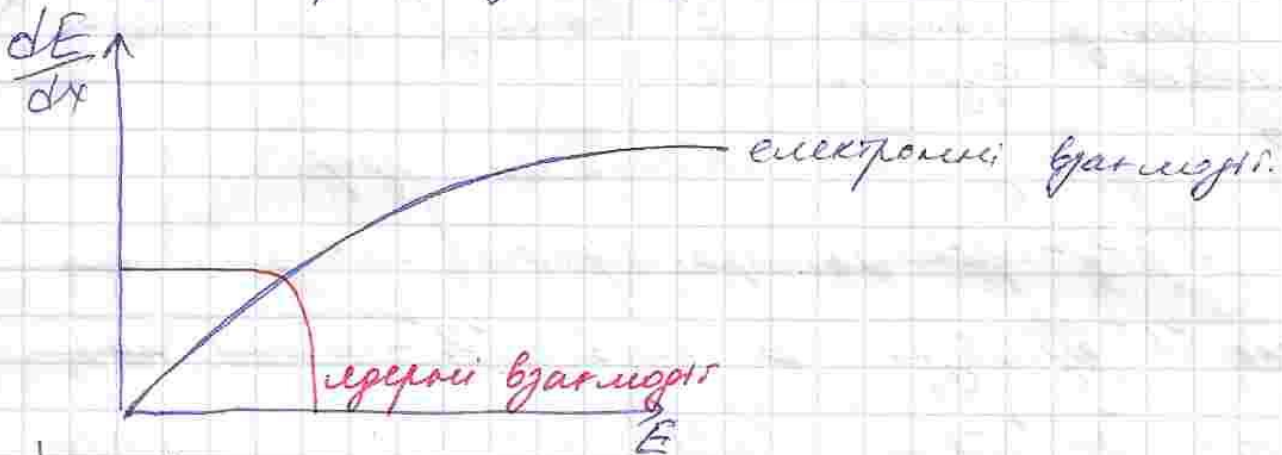
- простота
- дешево
- швидкий
- дозволяє ефективно обробл. велику к-сть

Недоліки:

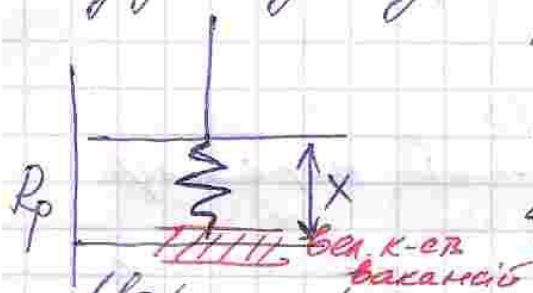
- висока темп. тому мобіль-
 сть. ІС на поч. етапах
- повільно контролюваний (тільки P, T, t)
- екологічно небезпечний (PH_3 -отруйний)

17.11.2015р.

Реакція кристалу на високоенергетичне іонне випромінювання



1) Механізми пружного розсіювання на електроні, що відбувається за законом Резерфорда. У цьому випадку R і передача великої E (маси електрона, внаслідок чого, маючи велику швидкість, і має бути центром удару) $E_{tr} \approx (10-20) \text{ eV}$ в кристалічній ґратці.



Можливо розглядати це як п-с, як п-с нормальний втрачений, що добре описує втраченню $2 \times$ пружних кулях. **Другий механізм втрачений енергії:**

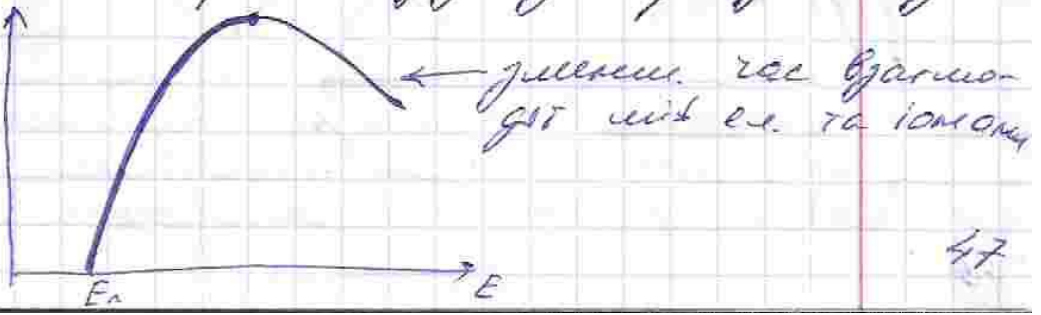
- малий кут розсіювання.
- передача великих енергій \Rightarrow масована генерація вакансій \Rightarrow порушення ґратки до повної аморфізації.

іф E_i така, що $V_i \approx V_F$ $E_F \approx 15 \text{ eV}$ при $E \sim 10 \text{ keV}$

$V_F = 10^5 \text{ мр-висока}$; V_i мала.

Змінюється механізм втраченню іона. У т.ч. і поглинання іона. Першого енергії відбувається за рахунок утв. квазімолекули C^+

Електрони на розсіюються на іонах



На поз. стані іон втягнута з м. оболонками
Найд. к-ст вказаної утвор. напружених фракцій-
ного пробну іона. На позатку буде майже
непоруйно структура тт.

2) Втягнута з м. оболонками цфер
 $R > R_p$ - проєкція фракційного пробну

Індекс "1" вказує на до іонів, "2" - атом лінійні

$$R = \frac{(z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{3/2}}{z_1 \cdot z_2} \cdot \frac{M_1 + M_2}{M_1} K \cdot E_i$$

$K \approx 0,07$, коефіц.

$$R_p = \frac{R}{1 + b \left(\frac{M_2}{M_1} \right)}$$

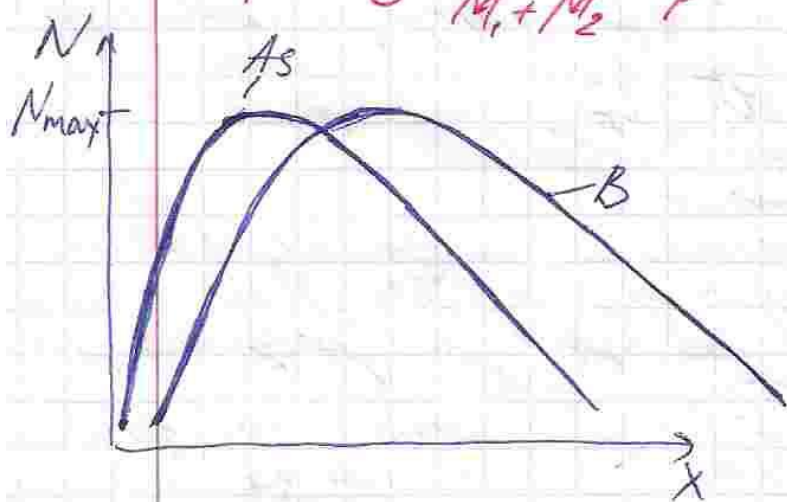
$$b = 0,2 \div 0,35$$

b - прийнятий параметр

Дані експериментальні ф-ми отримані висвітленням
моделью руху іонів у тт.

Процес гальмування екс. вл. к-ст газів, що
рух. по різних фракціях

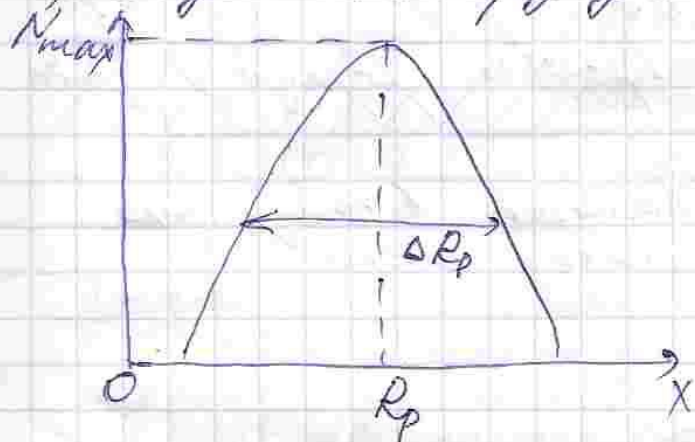
$$\Delta R_p \approx \frac{2}{3} \frac{\sqrt{M_1 M_2}}{M_1 + M_2} \cdot R_p$$



Розподіл фізичних

Найпростіший розподіл Гурсона - симетричний Гаусс.

1) Максимально розподіл Гаусса



$$N_x = N_{\max} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right]$$

Функція на графіку - сумарна доля металургів дошки

доля $\Phi = \int_{-\infty}^{\infty} N(x) dx = \int_0^{\infty} N(x) dx$ (звісно так, коли у нас розподіл занурений в певний повн.)

$$\Phi = N_{\max} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right] dx = \sqrt{2\pi} N_{\max} \Delta R_p$$

$$N_{\max} = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p}$$

$$N_x = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right]$$

аналітичний вираз для розподілу, застосовується по ширині.

Щоб визначити дозу треба записати вираз у вигляді $\frac{1}{x}$ дозу, а потім проінтегрувати.

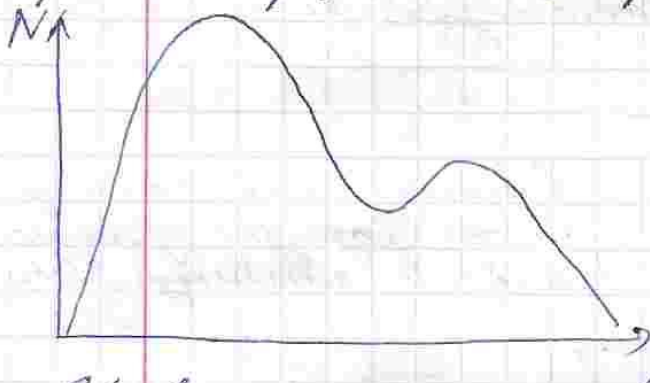
Несиметр. розподіл, матричний розподіл історич. величину к-ст. вагання

Щоб зменшити к-ст. дефектів потрібно підвищити, але при врахуванні першого перед дифузійним процесом, бо вступ. розподіл

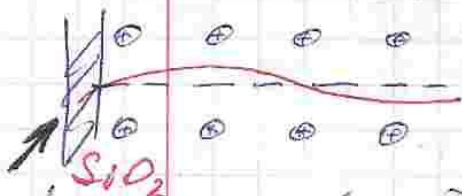
$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ - середнє значення при ридуції
 мінімізувати різницю можна роблячи матері-
 ний витрат протягом дуже короткого часу.

Щоб подати кремнієві профіль розподілу треба
 варіювати енергію.

Зависить **каналування**, каналів. В тому, що
 профіль розр, що з'являється є свого



У вип. коли кут падіння пучка такий, що
 коли рух іть ад. площини, б'єтання іть
 атомними площинами в колективі.

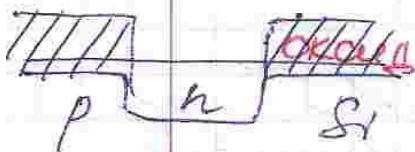


Щоб уникнути цього з'являється
 на поверхні пелает шар
 оксиду перер тил як відбиває в
 моментатор. На оксиді з'являється частини іонів

Або пускати пучок іонів по величезній
 кутами до атомних площин.

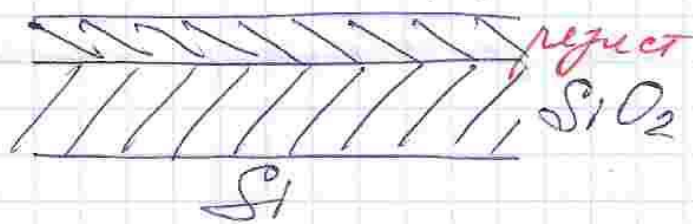
Літографія

Щоб створити малюнок треба мати поверх-
 ню.



На кремній наносимо
 шар оксиду, створ "вікно"
 за допомогою іонної літографії.

Щоб зробити "вікно" на поверхню оксиду
намоєнно резист. і ставимо на центри-



фузу ≈ 45 тис. об'єд.
Краще тонким шаром
розподіти по поверхні
пластику.

і треба його після

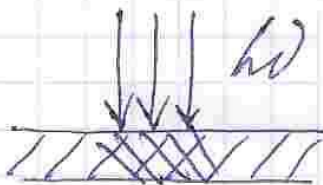
сушки закріплювати.

Фігура резисту — змінна хім. власт. під дією

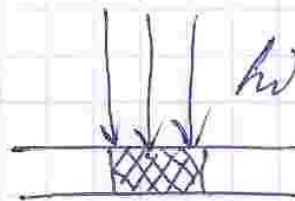
- ВІДП. ЛІТОГРАФІЯ
- 1) світло (фотолітографія)
 - 2) електрони (електронно-променева)
 - 3) іони
 - 4) imprint - вдрукування

Види резисту

1) негативний



2) позитивний



Відбувається зміна у резисті

хім. стійкість зростає
під дією експозиції

хім. стійкість резисту
зменшується під дією експозиції

В деяких резистів використ. полімерні
решітки. Молекули мають бути у
взаємній мережі.

Хім. властивості у полімерів змінюються,
до:

1) тем вище мала вага, тем більше
хтв. стійкість.

2) стійкішим будуть ті, які з більшим м'якш.

53 empty

54 empty

55 empty

56 empty

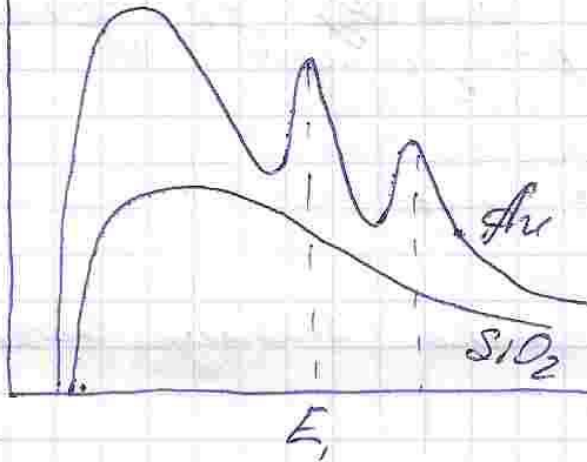
Рентгенівська

літографія

8.12.15

Щоб отримати
потрібно, щоб
мала велику

контраст рентген. пром.
матеріал, де почин. промені
знах. коэф. поглинання

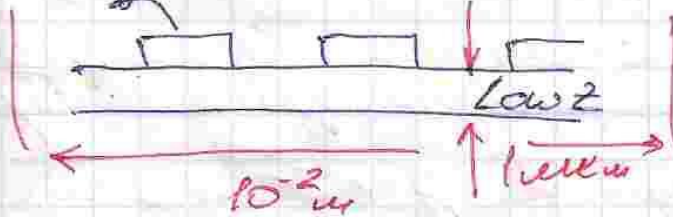


Мат. пов'язані з
енергією зв'язку да-
ного матеріалу

Більше значення
 μ дає великий фото-
ефект

$\mu_{\text{SiO}_2} > \mu_{\text{Si}}, \mu_{\text{Al}} > \mu_{\text{Si}}$

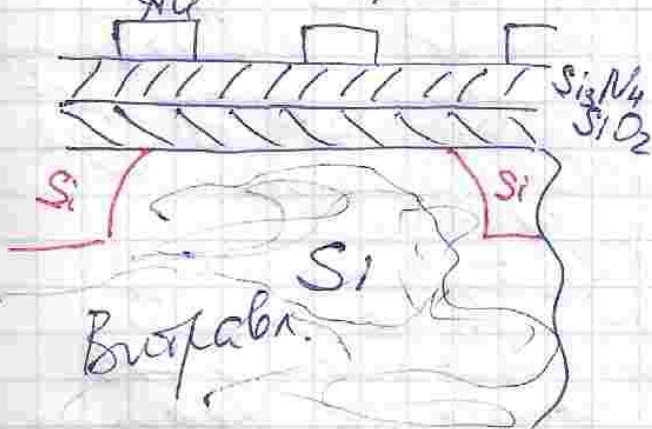
Треба сформував маску, що скл. з:



Прозорий шар з мінімумом
на меншій част. елем.
зображення з великим

Товщина шару ~ 1 мкм
Діаметр маски для
рентген. літографії визна-
чається розміром зма-

Спершу на поверхні товстого шару Si
виконав шар SiO_2 і зверху шар Si_3N_4




Заг. товщ. шару ~ 1 мкм.
Методом еп. літографії
на поверхні формуються
потрібний малюнок,
який має бути абсо-
лютно інертним - Au
Полі. формування консь-
трабують до SiO_2
всі кремній і мідь
на являть на короткому

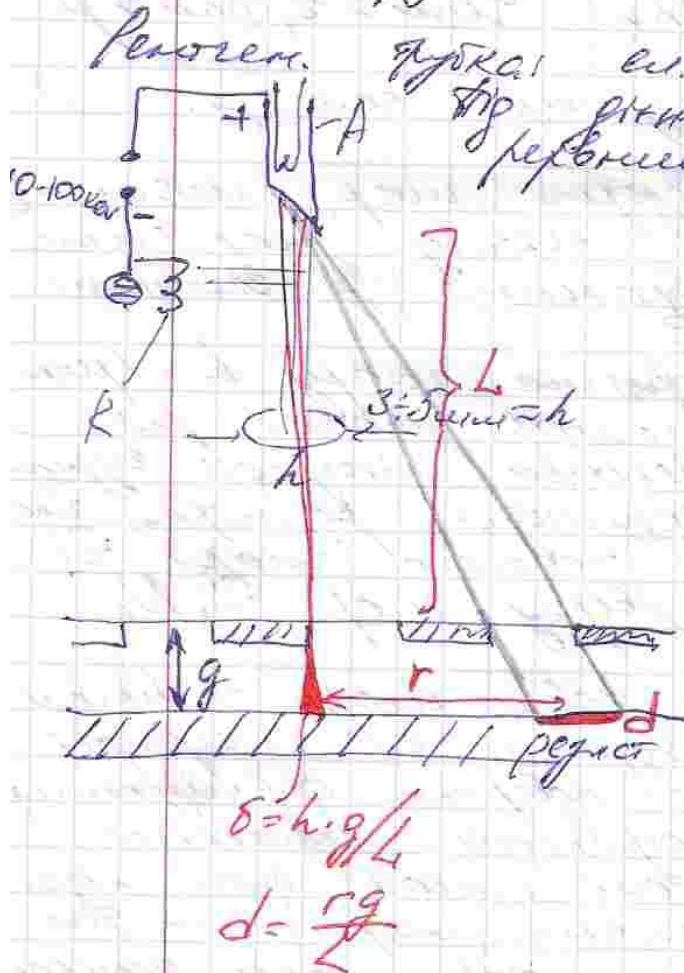
Колонн 7 краснотон.

[illegible]

Недолік: - висока вартість
- низький ККД

Односторонние ветровые нагрузки имеют большую интенсивность

Резонанс.

 Этим же способом можно определить частоту резонанса, при которой реактивные сопротивления индуктивности и емкости взаимно компенсируются, и ток в цепи имеет максимальное значение.



На певній вулиці в масці жовт. чар
режису. 22.30

Хермес, магомину буре
многими геруд саотво-
реним. роштуру за рах
множества згекла

2) if вытрав. уже 1
токовой стержня из
внешним кром. со
перест. то 1 буде
вырезается.

ККА прутки - 0,01%
h-интервалы темноты

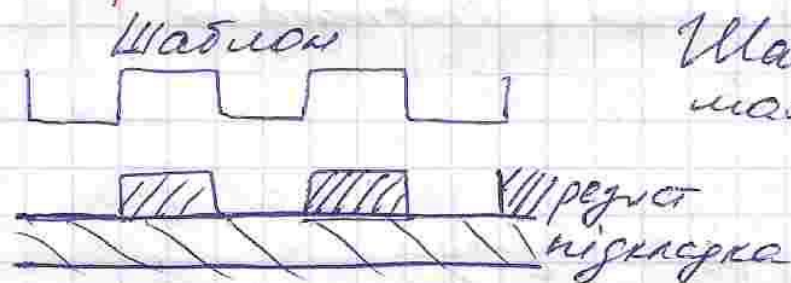
Фервага: - зас експонирт масини в 1х6
- немаат дифракц ефектв за рачунок

- експозиція в певній версії, зрозуміло як рах.
- високої інтенс. релієф. вираж.
- низька ефективність блискотності
- зворотний ман. строю вертик. стіни
- не чутливий до забруднень маски

Недоліки:

- неможливість зчитування
- можливість пошкодження створень
- висока вартість
- малий KLD

Imprint літографія



Шаблон з твердим матеріалом. Шаблон накладається на резист. Резист зрештою може деформуватися під дією шаблону.

Далі проводиться резист. Всюди є така жінка. Далі травлення. Далі сформовування в тонких місцях залиши. Мембрана.

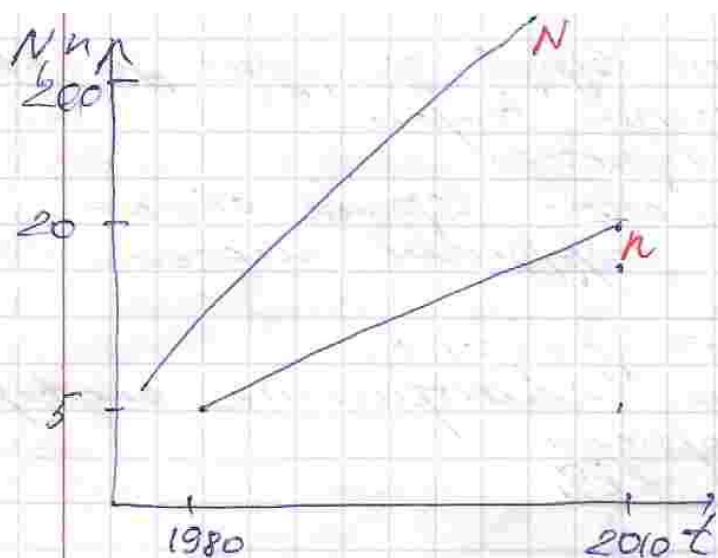
Недоліки:

- швидкий
- вартість

Недолік: - ціна розрахована за одиницю ~ 60-90 мкм

Застос. у створенні IC з малим ступенем інтеграції / аналогові мікросхеми, цифрова логіка

N - зр. к-сть операцій в літографії
K - к-сть літографічних процесів



Необхідно, щоб матеріали відповідали
вимогам по площі $\Delta S \sim 20\%$

Значить мінімально розміру $\Delta a \approx 10\%$

$$(S + \Delta S) = (a + \Delta a)^2 = a^2 + 2a\Delta a + \Delta a^2$$

$$\Delta S + a^2 = a^2 + 2a\Delta a + \Delta a^2$$

$$\Delta S - 2a\Delta a + \Delta a^2 = 0$$

$$\Delta = 4a^2 - 4\Delta S = 3,2a^2$$

$$\Delta a = \frac{2a \pm \sqrt{3,2a^2}}{2} = a \left(\frac{\sqrt{3,2} - 2}{2} \right) = 0,1a$$

$$\Delta S = 0,2S =$$
~~$$= 0,2a^2$$~~

Суміщення матеріалів лише у електронних
мікросхемі. І проблема суміщення.

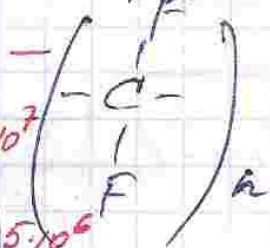
Діелектрики. Властивості

Діелектрики використовують для ізоляції;
наприклад в підставному шарі

Мінімальна товщина шару $\sim 10 \text{ нм}$, шари
будуть проводити за рахунок дрібного ефекту

Діелектрики - р-ми з широкою
і малою провідністю (ρ) $3.3 (3.5) > eV / (2eV)$

	$\rho (\Omega \cdot \text{см})$	ϵ	$E_{кр} \text{ В/см}$	$\text{tg } \delta$
SiO_2	$10^{16} \div 10^{18}$	4,9	$5 \cdot 10^6$	тефлон
Мє	$10^5 \div 10^4$	—	—	—
ПТФЕ	$10^{16} \div 10^{18}$	2,1	10^7	—
Al_2O_3	$10^{15} \div 10^{16}$	8,7	$5 \cdot 10^6$	—
NaCl	$10^{10} \div 10^{12}$	2,5	10^6	—
HfO_2	$10^{15} \div 10^{17}$	26	$5 \cdot 10^6$	—

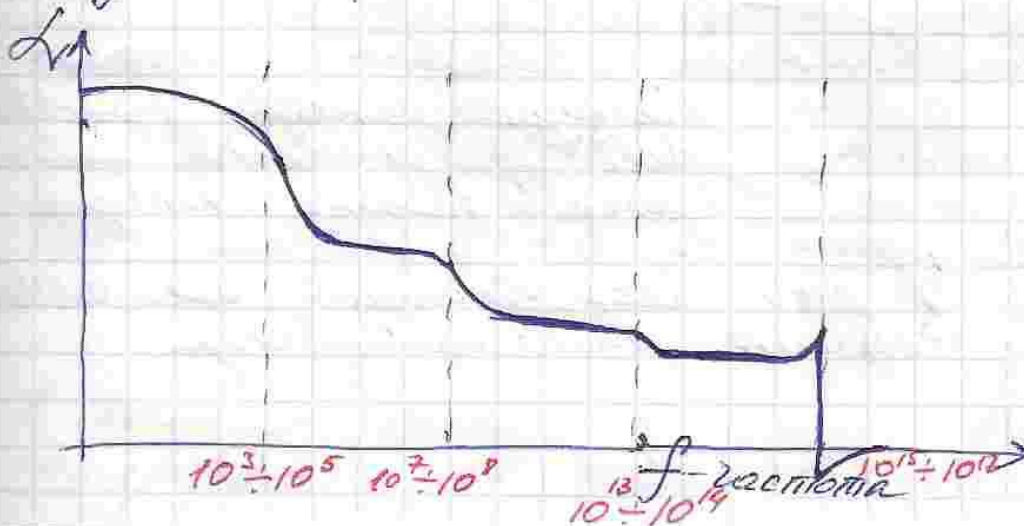


Діелектрична спротивність
Діелектрична проникність показує зв'язок між:
D - індукцією та E - ел. полем.

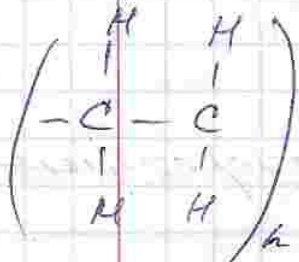
$\epsilon = \epsilon' + \epsilon''$ ϵ' - поперемінність
 ϵ'' для іонних матеріалів ϵ' - кінча розовини
 $E_{кр} \sim 5 \cdot 10^6 \text{ В/см}$

$\text{tg } \delta$ - тангенс кута втрат $\text{tg } \delta = \frac{\text{Im } \epsilon}{\text{Re } \epsilon}$

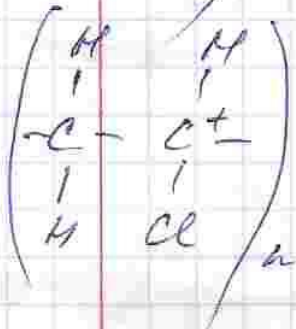
Тангенс діелектрики - див. в яких є димоні
(від $\epsilon \sim 82$)



10.12.2015



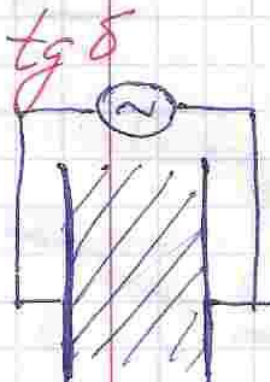
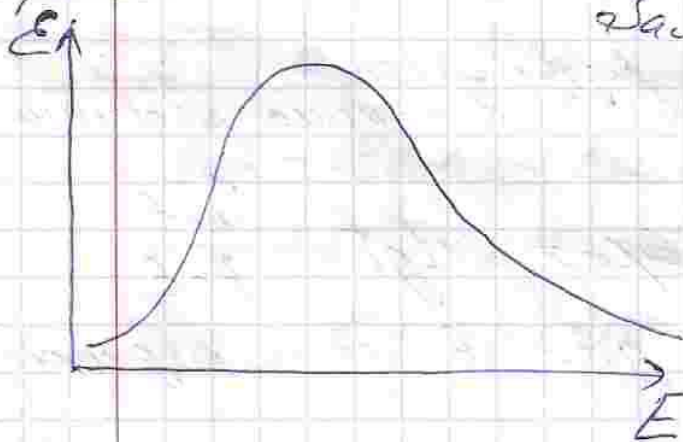
поліетилен - неполярний



полівінілхлорид - полярний діел.

Лінійні діел. $\epsilon \neq f(E)$ не залежать від величини електричного поля

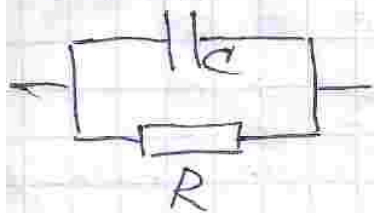
Неліній діел. $\epsilon = f(E)$ переважно сегнетоелект. Залежать від величини ел. поля



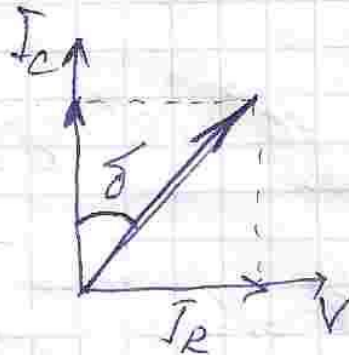
Вимір затов. діелект. риком, до якого прикладено змінна напруга

$\text{tg } \delta$ діел. має великий, але скінченний питомий опір

Свідан. схема такого конденсатора



Діаграма струму:



$$I_C = \omega C V$$

$$I_R = \frac{V}{R}$$

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V}{R \omega C V} = \frac{1}{\omega C R}$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon}{\omega \epsilon \epsilon_0}$$

ϵ - провідність діелектрика
 ϵ_0 - діел. стала

$$W = \epsilon E^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon E^2 \tan \delta$$

Наєвність втрач. з'являючись тепловою енергією та частоту

Діел. має міграційну складову поляризації тобто має іони. А іони під дією ел. поля можуть дифундувати.

Міграційна складова поляризації перестає працювати на частотах $10^5 \div 10^6 \text{ Гц}$ (З.В. наслідок)

На частотах $10^7 \div 10^8 \text{ Гц}$ починається процес і перестає працювати решітчаста поляризованість, тому виходить на рівень ел. поля решітчаста, коли решітчаста обертається решітчаста.

При частотах $10^9 \div 10^{10} \text{ Гц}$ починає іонна поляризація.

В іонному кристалі З ескриво втрачено іонна поляризація. Ін таку структуру поміщає в 63

ем. поле то іони Na і Cl будуть змещені і буде утвор. іонна полярність.



При частотах $10^{15} - 10^{17}$ відрив електронної полярності зникає

З того ж зру змещення відрив необхідно, щоб була електронна полярність

Типи провідності діелектриків

якщо розрив діел. буде великим, тоді маскують і будуть привертати до втрач.

В аморфних матеріалах немає зв'язу рухливості.

У кристал. діел. 3 типи провідності

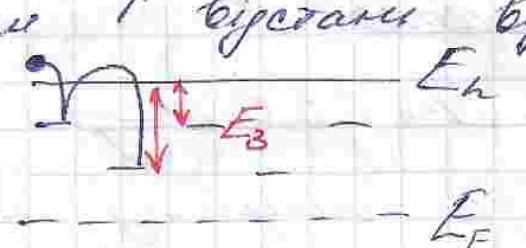
1) Френкелівська провідність
Треба певну частину носіїв отримати в зоні провідності

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

2) Врибкова провідність. Виникає внаслідок того, що у діел. поблизу зони провідності є дискретні рівні "паски" газ електронів. Т.зв. F-центри в іонних-галогенних металах. Виникають тоді, коли іони металу виважені з металотра-метала електронів. Кванта мотн. випром. достатньо щоб збудити електрон. У кристал. мабуває конформаційна залежність від швидкості нагрівання. Ем. у френкелівській в ЗП захоп. рівнями і може не мати жодного зовнішнього факт.

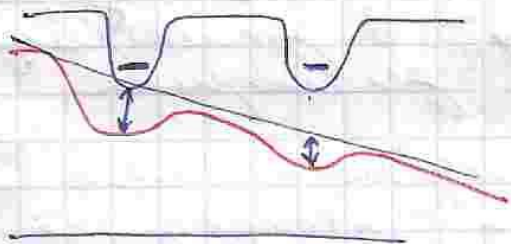
$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

Чим \uparrow вірстані від рна ЗП до рівня, тим E_z - енергія заряджання.



/// /// /// E

if \uparrow с-ма потен. ел. в яких макродинам. масі поблизу рна ЗП, нахилуючи ел. поле картинка зміниов. E_z тст зміниоват. (зменшуватиметься $\Rightarrow T \downarrow \Rightarrow$ перенос наближатиметься до дрейфового переносу)



Грибої - наближені ефекти. Можемо пробувати демонструвати.

Типи грибоїв

1) **Тепловий.**

Приймає: зростання енергій $\sim E^2$ це призв. до зменшення в діелектрику певної кількості тепло.

Розірв в локальній обл. призведе до \uparrow концентрації носіїв $\Rightarrow \uparrow$ провідності \Rightarrow зворотн $\Rightarrow \uparrow$ провідності \Rightarrow виникає наближення

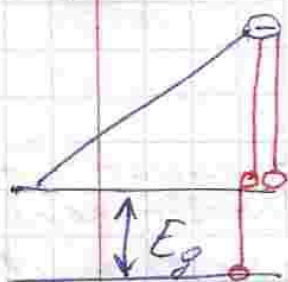
Тепловий. рел. має бути достатньою, щоб це забезпечити треба поліпшити шіт $\&$ ме діелектрик. Сам явний шор для електронів не з'являється.

2) Тепловий пробій

З зменш. товщ. критичне поле збільшується.

$$F = eE \quad / \cdot l \Rightarrow W = eEl > E_g$$

як ем. буде більша за ширину ЗЗ, це призведе до того, що електроном можна буде створити електронно-дірковий пар \Rightarrow лавина.



З точки зору температурності цей н-с розвив. швидше, ніж тепловий.

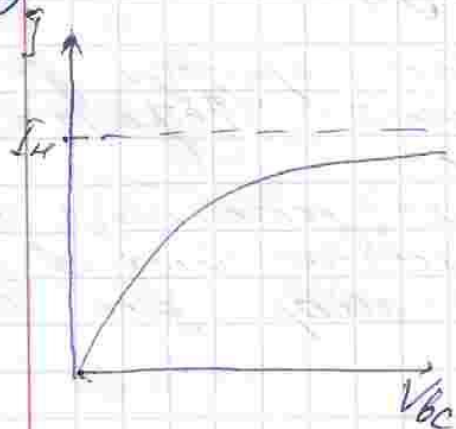
Тепловий пробій більш рідкісний. З'являється можливість протікання струму під дією Е, це призведе до електролізу в діелектрику і псування властивостей діелектрика.

З 2005р. мікро- і нанотехнології почали застосовувати SiO_2 тонкими діелектриками.

Товщина діел. фільм призводить до I велич. м. розриву струму в МОН транзисторі ($J = 10^2 \text{ A/cm}^2$)

При масштабуванні $RC = \text{const.}$

Струм насичення МОН-транзистора



$$I_n = \frac{W}{L} \mu C_i \frac{(V_g - V_n)^2}{2}$$

L - довжина каналу
 μ - питома рухливість
 W - ширина каналу
 V_g - напруга затвору
 V_n -

При розмірів L та W .

При площі S на відстані d площі S .

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}; \text{ при } 1 \text{ м площі } S.$$

Інші діелектрики:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 - \epsilon = 7 \div 8$$

$$\text{TiO}_2 - \epsilon \approx 65$$

$$\text{HfO}_2 - \epsilon = 26$$

$$\text{SiO}_2 - \epsilon = 3,9$$

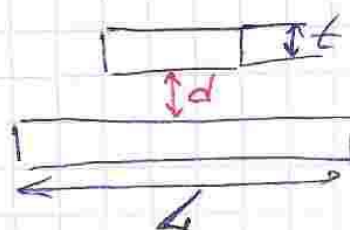
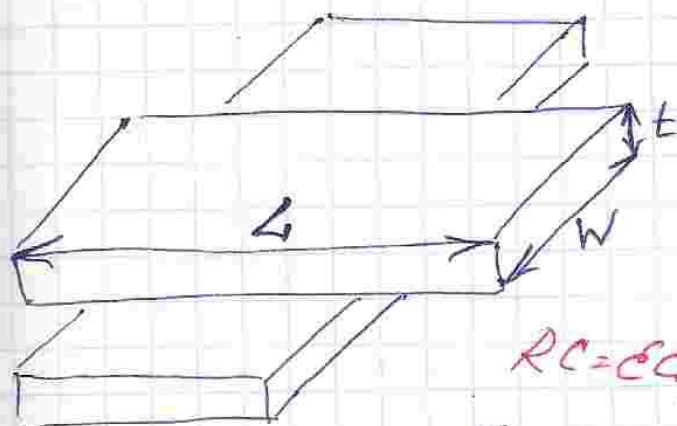
Необх. товщ. діелектрика HfO_2 еквівал. шару SiO_2 товщ. 1 нм

$$h = 1 \text{ нм} \cdot \frac{\epsilon_{\text{HfO}_2}}{\epsilon_{\text{SiO}_2}} \approx 6 \text{ нм}$$

HfO_2 заміщує товщ. шару SiO_2 товщ. 1 нм

Вимоги до діелект., які використовують у багаточисловій металізації:

- краща теплопровідність



$$RC = \epsilon \epsilon_0 \rho \frac{L^2}{d t}$$

Тут можна

зменшити ϵ

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Зараз є шари для створення з меншим
місцем щоб зменшувати РС.
Використов. поруваті матеріали (масивний
гіпсостас)

Створ. з. зв. аерогель-матеріали з великою
к-стю поруватих проміжків. $C = 1,8 \div 2$

