

# Фізичні основи мікроелектроніки.

07.02

Електроніка - область науки, техніки, виробництва, що охоплює дослідження, розробку та використання приладів електроніки.

М. Ел-ка - область ел-ки, що охоплює дослідж., викор. нових приладів - електроніки інтегр. мікросхем.

Транзистор -  $1 \text{ г}$ ;  $0,5 \text{ см}^3$ ;  $15 \text{ мВт}$  мВт (найкращий елемент).

Для того, щоб побудувати процесор неюб не менше  $10^6$  см-ментів. Якщо виконати цей процесор з дискретних елементів, то  $m = 1$  тонна,  $V = 0,5 \text{ м}^3$ ,  $P = 15 \text{ кВт}$ .

Надійність - головна хар-ка схеми. Якщо схема з багатьох ел-тів, то (1 елемент  $10^{-5} \text{ год}^{-1}$  - надійність;  $10^5 \text{ год}$  - 1 вимова) заг. надійність  $10^{-5} \times 10^6 = 10 \text{ год}$ , бо позі  $n/3$ , тобто дуже мала надійність (необхідно штат налагодчиків).

Інтегр. мікросхема - сукупність <sup>багатьох</sup> кількох <sup>взаємнопов'язаних</sup> елементів виготовлених в <sup>одному</sup> <sup>на одній підкладці</sup> технологічному циклі. викор. перетвор інтеграл.

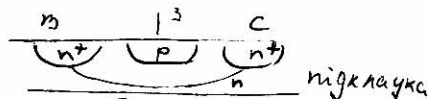
Для єдиної тех. циклу викор. тільки один ел-т: транзистори, діоди з однією матеріалом (не з декількох) (Si, або GaAs). Для інших ел-тів матеріалів інша схема.

Випот. в єдиних умовах (одн. цикл) порівнює розкиду параметрів елементів  $\Rightarrow$  однотипні ел-ти  $\Rightarrow$  кращі показники надійності. Однакові умови  $\Rightarrow$  однакова якість, краща ніж при дискретності.

Класифікація ІМІСХ.

- за матеріалами, що викор. напівпровідникові ІМІСХ.

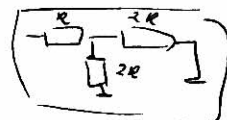
Сутасна е-ка - плакарка (на плацині в припо-  
бурхн. шарі).



На польовому ефекті  $\nearrow$  будуються активні елемент

плівкова ТМС - зроблена або з металевих, або діел.  
плівок, це окремий клас талу, що  
матеріалів, що мають товщину плівкою,  
дуже багато і мають хар-ри риси  
(різні товщини плівки, діелектрик  $\neq$  провідник і мо-  
жна зробити магнітними (плівка). Але нідомік -  
активні елементи не можна побудувати. Тобто плівкова  
сх - тільки пасивні елементи.

ЦАП, АЦП.



14.02

Плівкові ТМС мають різну основу -  
метал, діел., н/п. Але активних ел-тів ще не  
створено.

Схеми, що комбінують плівкові і окремі дискретні  
активні ел-ти (зборок активних ел-тів) і  
розташовані на кількох підкладках пасив.  
гібридними ТМС.

гібридні позік. на тонко та товстоплівкові  
до 1 мкм  $>$  1 мкм.

Сильні ел-ти  
(велика потужність)

Плівкові технології поширені, бо той діапазон  
L, R, C значно ширший ніж в н/п техноло-  
гіях.

Суміщені ТМС - ТМС, що складаються з  
активних ел-тів, що виконані в приповерхне-  
вому шарі і плівкових пасивних ел-тів.  
(підкладочка н-пр).

## Класифікація за к-стю ел-тів

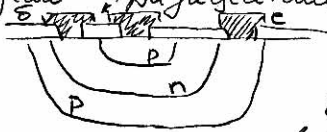
- класифікація за к-стю ел-тів на 211  
6 x 6 мм - стандартний розмір одного піну.

- а) прості - до 100 ел-тів
- б) середні 100 - 1000
- в) велика > 1000
- г) супер велика > 10000

## Базовий ел-т

Більш досконаліша МДН структура, бо її можна використувувати як n, p, n в залежності від вимог.

Біполярний тр-р має містити 3 шари. Якщо будувемо традиційний тр-р (вертикальний):



розмір буде більший за МДН, бо там не потрібно перекаликно-вувати.

Розмір МДН стр-ри набагато менший.

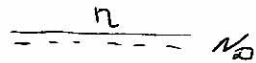
Отже базовий ел-т - МДН стр-ра. Як n/p використовують Si, бо це технологія розвинута.

## Різні основи.

Власна провідність n/pr:

випи коє за рах.

власних n/pr. Частик n/pr не буває, то беруть n/pr, який наближене не плуває.



Хімічний потенціал - енергій для того, щоб виникли частинки на  $\infty$ . Фактично це енергія Фермі (статистичний показник)

p

Для того, щоб зсувати рівень Фермі за рах. домішки, то необхідно термічно іонізувати домішку.

Для малих домішок  $kT \gg E_i$  тому лінійне - ефективно.  $kT \approx 0,025 \text{ eV}$

Si 1,1 eV  $T = 300 \text{ K}$   
GaAs 1,4 eV

У кожного  $n$  і  $p$  в зоні є певна щільність станів і іоніз. домішка (св-м) займає ці стани. Якщо щільність мала, то св-ми займають стани з великою енергією  $\Rightarrow$  виродження св. газу в  $n$  і  $p$   $\Rightarrow$   $n$  і  $p$  стає провідником.

щільність станів  $N_c$  залежить від еф. маси і температури матеріалу

де  $N_c = 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{16} \left( \frac{m_n}{m_e} \right)^{3/2} T^{3/2}$

$N_v = 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{16} \left( \frac{m_p}{m_e} \right)^{3/2} T^{3/2}$

$m_p > m_n \Rightarrow N_c < N_v$

Збільшили св-нів вгорі (зона провідності) веде до того, що  $\uparrow E_F$  вгору.

$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$  - концент-ція св-нів в зоні пров.

$p = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{kT}}$

$\sqrt{np} = \sqrt{N_c N_v} \exp \left\{ -\frac{E_c - E_v}{2kT} \right\} = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} = n_i$   
концентрація власної провідності

$n_i$  визначає дрефовий опір: ми можемо збільшити провідність, а зменшити не можемо. Е збиткові струми за рах  $n_i$ .

$$n/p = \frac{N_c}{N_a} \exp \left\{ - \frac{E_c - E_F - E_F + E_v}{kT} \right\} = \frac{N_c}{N_a} \exp \left\{ - \frac{E_c + E_v}{kT} \right\} e^{2E_F/kT}$$

( $\times n_i \div n$ ) і  $\ln$ :

$$n^2/pn = n^2/n_i^2$$

$$2 \ln n/pn = \ln \frac{N_c}{N_a} - \frac{E_c + E_v}{kT} + \frac{2E_F}{kT}$$

$$2 \ln n/n_i = \ln \frac{N_c}{N_a} - \frac{2E_F}{kT} + \frac{2E_F}{kT}$$

Якщо не брати до уваги різниці ср. мас, то  $N_c = N_a$ , тоді:

$$E_F = E_E + kT \ln n/n_i$$

Якщо маємо, то  $N_a = n$ , то  $E_F = 1$ .

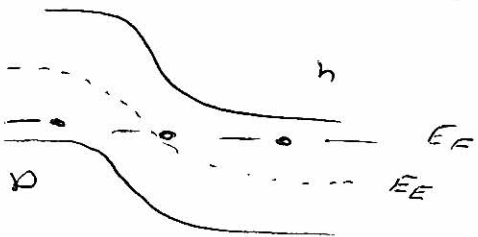
Діапазон м. данішок  $10^{15} \div 10^{18}$

$10^{19} \Rightarrow n/p \rightarrow$  метал.

Є певна гранична провідність

Для  $n/p$   $p$ -типу:  $E_F = E_E - kT \ln p/n_i$   
 $p = N_A$ .

$p$ - $n$  перехід.



$E_E$  - електростатичний потенціал  
 В рівноважних умовах  $\frac{dE_F}{dx} = 0$ .

$N_c = 10^{21} \text{ см}^{-3}$   
 $N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$

$$-\frac{dE_F}{dx} = kT \frac{d \ln n/n_i}{dx} = kT \frac{dn/dx}{n}$$

- електричний поле  $E$  зі знаком "

$$n e E = kT \frac{dn}{dx}$$

Дифузійно-дрейфові рівняння:

$$\mu E n = e D_n \frac{dn}{dx}, \text{ бо } j = 0$$

Бачимо, що дрейфовий потік працює проти дифузійного  $\Rightarrow$  співвідношення сінглетона.

→ дрейфовий



$$\mu_D = \frac{e}{kT}$$

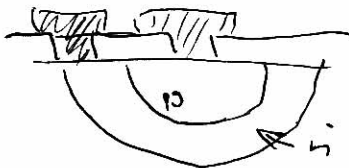
Фізичні обмежені величини бар'єра:  $E_{EP} - E_{En}$  - висота бар'єра.

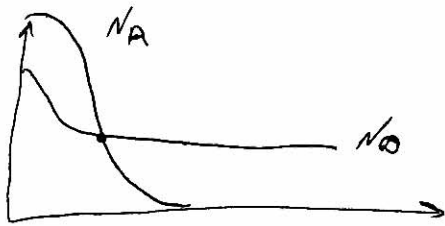
з ф-ми  $E_F \dots$

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_0 &= E_{EP} - E_{En} = kT \ln \frac{n}{n_i} + kT \ln \frac{p}{n_i} \\ &= kT \ln \frac{np}{n_i^2} = kT \ln \frac{N_A N_D}{k T n_i^2} \end{aligned}$$

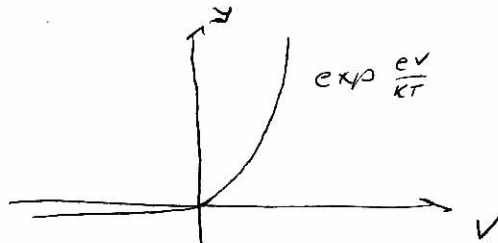
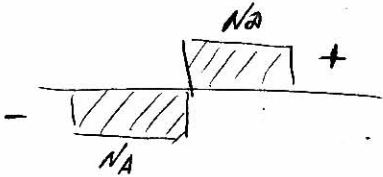
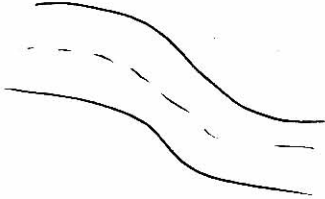
$$\boxed{\Delta \varphi_0 = kT \ln \frac{N_D \cdot N_A}{kT}} \quad \text{висота бар'єра}$$

Але  $N_A$  і  $N_D$  не можуть досягнути  $n_i$  і  $N_D$ .





Розподіл ел. поля :



дифузійний струм  
це струм неосновних носіїв

Якщо розглянемо ч/пр з короткою базою, то ел-ни, інжектовані в р-область, рекомбінують, але до цього моменту вони можуть пренести струм.

Запишемо р-ня, що описує процес зміни к-сті носіїв:

$$\frac{dn}{dt} = g - \underbrace{\delta n}_\rho - \text{кінетичне р-ня}$$

генерація      анігиляція

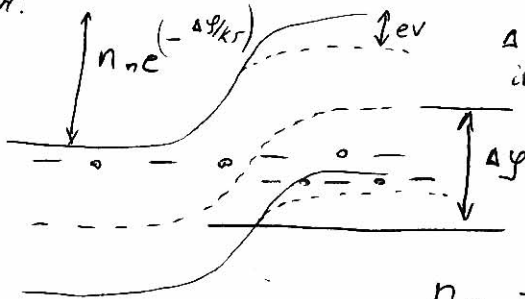
Для стал. випадку: термічна генерація = рекомб  
 $\frac{dn}{dt} = 0 \Rightarrow g = \delta n \rho_0 \Rightarrow$

$$\Rightarrow \frac{dn}{dt} = -\delta(n\rho - n_0\rho_0) \quad (1)$$

$$dn = d(\Delta n)$$

$n = n_0 + \Delta n$ ;  $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$   
 рівноватн. при прикладанні напруги.

Прикладання напруги  $\equiv$  опускаємо чи піднімаємо зон:



$\Delta n$  змін. за рах. інжектованих носіїв

Рівень Фермі таке ~~перероз~~ буде різний для  $n$  і  $p$  одност.

$$n_p = \underbrace{n_n \exp - \frac{\Delta\varphi}{kT}}_{n_{p0}} \exp \frac{eV}{kT}$$

$\Delta n$  в р-обл:

$$\Delta n_p = n_{p0} \left( \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right)$$

Розглянемо р-ня неперервності:

$$\begin{aligned} (1) \Rightarrow \frac{dn}{dt} &= -\delta \left( (n_0 + \Delta n)(\rho_0 + \Delta\rho) - n_0\rho_0 \right) = \\ &= \underbrace{-\delta (n_0 + \rho_0)}_{\text{маленький}} \Delta n, \text{ не врах. } \Delta n \Delta\rho, \text{ бо} \\ &= -\frac{\Delta n}{\tau} \end{aligned}$$



Останнє  $p$ -не справедливе для  $\neq$  області,  
 $\tau$  - час життя ел-на.

$$\Delta n_p = \Delta n_p(t=0) \exp - \frac{t}{\tau}$$

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{\Delta n}{\tau} + \frac{1}{e} \operatorname{div} j$$

— враховує в котко-  
 му перерізі приклад та  
 вигід носіїв.

Якщо поле немає, то струм дифузійний:

$$j_n = e D_n \frac{dn}{dx} \quad \text{і відслідковуємо}$$

отримаємо :

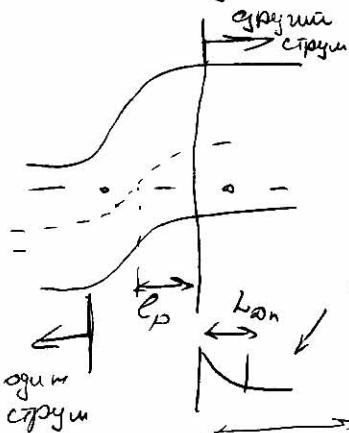
$$- \frac{\Delta n}{\tau} + D_n \frac{d^2 n}{dx^2} = 0$$

стат. випадок

саме це  $p$ -не описує дифузійне змищення

Розв'язок:  $\Delta n = C \exp - \frac{x}{L_{Dn}}$

$L_{Dn}$  - довжина дифуз. змищення для ел-нів



$L_p$  - проширение поле в р-обл

спад концентрації інтс. носіїв.

Якщо  $W \gg L_{Dn}$  -  
 відг з довгою базою  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  ел-ни не доходить  
 до металу, а рекомбінують

Повний струм:  $j = -e D_n \left. \frac{\Delta n_p}{L_{Dn}} \right|_{L_p} - e D_p \left. \frac{\Delta p_n}{L_{Dp}} \right|_{L_n} =$

$$= - \left[ e D_n \frac{n_{p0}}{L_{Dn}} + e D_p \frac{p_{n0}}{L_{Dp}} \right] (e^{eV/kT} - 1)$$

Струм насичення :  $e^{eV_{кт}} = 0$

Для р-n переходу діодна та диодрузійна теорія дає однаковий результат.

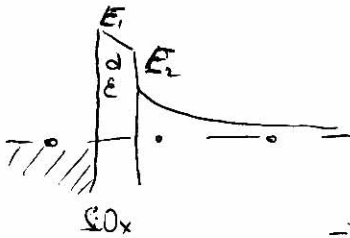
За природою прямиї струм - рекомбінацій-звор. - генераційний (термоіон.).

Для Si  $\approx I_{зв0} \sim 10^{-6} A$ .

Зірцїїїність стр-ри визначає тов  $\tau$  - часом життя неонових носіїв. Для  $\downarrow$  іпру, треба  $\downarrow \tau$ .  
Далішканим Аи можна створ  $\tau \sim 10^{-9} c$ .

## КОНТАКТ МЕТАЛ - n/nr

Щоб таку стр-ру зробити, треба виготовити тїсний контакт, а це важко, бо відбув. хїм. реакція і взаємне проникнення. На n/nr напильють метал. Це головна проблема - нанести метал (вїн окїдає нерївномірно) Лїше Al не створює хїм. сполуки з Si. Якщо взяли підкладку з Si і витягли на повітрі, то  $50^\circ A$  SiO<sub>2</sub>.



$\epsilon$  прошарок SiO<sub>x</sub> - діелектрик :

маємо  $\epsilon, \epsilon_0$   $E_1 = \epsilon_2 \epsilon_0 E_2$  -  
нїперервність м. полї

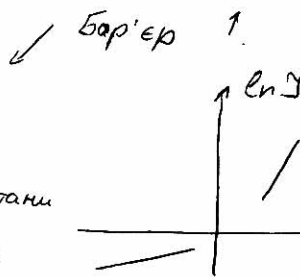
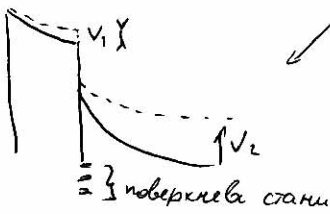
$E_2$  змінюється, тамі і змін.  $E_1 \Rightarrow$

$\Rightarrow \epsilon$  своє падїння напруцї  $V_1$  та  $V_2$ .

Якщо прикладаємо напруцї, то можемо змін. бар'єр.

$$j = j_s \left( e^{+eV_{кт}/kT} - e^{-eV_{кт}/kT} \right) - \text{ВАХ опти-суетьє так}$$

$V_1$  працює проти  $V_2$  збільш  $V_2$  ми зб'їр бар'єр.



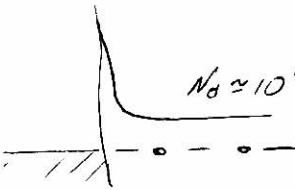
В цій теорії не розглядалося виникнення на границі заряду.

Активна зона приладів зніх на поверхні, яка є вразливим місцем.

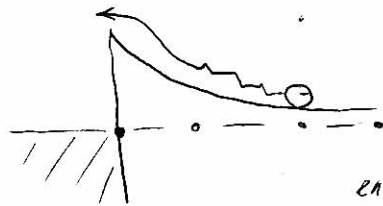
"+" - мають зворотній струм

"+" - швидкість, бо працюємо з основними носіями (ні західель, ні генерація, а лише проходження їх).

Має точний бар'єр і велику конц. домішок:

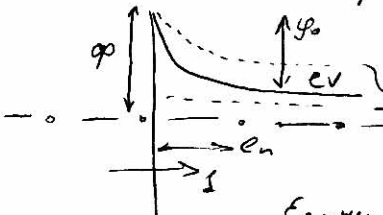


Тупеньке проходження ел-нами бар'єру  $\Rightarrow$  омський контакт



Якщо вона невелика прозорість, то струм контролює бар'єр.

Зигзаг - розсіювання, при цьому ел-н набирає енергію і долає бар'єр.



якщо надам напругу \$V\$:

для ел-нів з \$n\$ пр бар'єр, а з металу const.

Ел-ни будуть йти, бо є різниця по швидкостям і за напруженням:

$$J_1 = \frac{v_n \cdot n_m e^{-\frac{e\phi_0}{kT}}}{4} \quad (\ominus)$$

$$\textcircled{=} \frac{\partial n n_0}{4} e^{-\varphi_0/kT}; \quad \varphi_0 - \text{енергія, ані потенціал}$$

$$\text{Але } \varphi_0 = E_c - E_F + \varphi_0$$

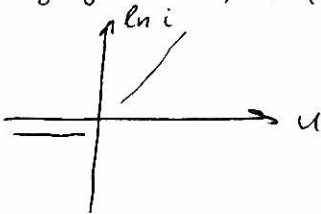
При напрузі  $U$  маємо, що  $\varphi_1 = \text{const}$ , а  $\varphi_2 \neq \text{const}$

$$\text{Отже } j = e \frac{n_0 \partial n}{4} \left[ e^{-\frac{\varphi_0 - eV}{kT}} - e^{-\frac{\varphi_0}{kT}} \right] = j_1(U=0)$$

$$= e \frac{n_0 \partial n}{4} e^{-\varphi_0/kT} \left[ e^{eV/kT} - 1 \right]$$

$$= j_s$$

В  $\varphi_1$ - $n_1$  не враховано процеси, що відбув. в  $0T_2$  це справедливо при  $L_n \ll L_D$  (довжина пробігу) - це гігантська теорія (ел-ни не встигають рекомбінувати)  $\Rightarrow j_s = j_1$



При  $L_n \gg L_D \Rightarrow$  відбув. дифузії ел-нів:

$$\partial n \quad e \partial n \frac{dn}{dx} + e \mu n E = i_n$$

$$E = \frac{1}{e} \frac{d\varphi}{dx}; \quad \mu = \partial n \frac{e}{kT}$$

$$e \partial n \frac{dn}{dx} + e \partial n \frac{e}{kT} \frac{n}{e} \frac{d\varphi}{dx} = i_n$$

$$\boxed{\frac{dn}{dx} + \frac{n}{kT} \frac{d\varphi}{dx} = \frac{i_n}{e \partial n}} \quad \text{дифузійно-дрейфове рівняння.}$$

Якщо  $p$ -ні згорижені:

$$n(x) = C e^{-\varphi(x)/kT}$$

$$\text{незгорі: } n(x) = C(x) e^{-\varphi(x)/kT}$$

$$\text{маємо } \frac{dC}{dx} e^{-\varphi(x)/kT} = i_n / \partial n e$$

$$dC = \frac{i_n}{\partial n e} e^{\varphi(x)/kT}$$

$$\int_x^L dC = \int_x^L \frac{i_n}{\partial n e} e^{\varphi(x)/kT}$$

В т. л. мативо  $\varphi = 0$ ;  $\frac{d\varphi}{dx} = 0$ ;  $n = n_0$ .

$$C(L) - C(x) = \frac{i_n}{eD_n} \int_x^L e^{+\varphi(x)/kT} dx$$

$\int$ -н диференціально розділення.

$$C(x) = C(L) - \frac{i_n}{eD_n} \int_x^L e^{\varphi(x)/kT} dx$$

$$n(x) = n C(x) e^{-\varphi(x)/kT}$$

$$n_0 \quad \quad \quad \Rightarrow C(L) = n_0.$$

маючи  $n(x)$  можна визначити струм.  
Знайдемо струм в т. л. бар'єру:

$$n(x=0)$$

$$n(x) = \left[ n_0 - \frac{i_n}{eD_n} \int_x^L e^{\varphi(x)/kT} dx \right] e^{-\varphi(x)/kT}$$

$$n(x=0) = \left[ n_0 - \frac{i_n}{eD_n} \int_0^L e^{\varphi(x)/kT} dx \right] \exp\left\{ \frac{-\varphi_0 - eV}{kT} \right\}$$

$$i_n = \frac{e \mu n kT (1 - \exp(-\frac{eV}{kT}))}{\int_0^L e^{\varphi(x)/kT} dx}$$

Якщо  $N(x) = dx - \text{гіор}$  Мотта

В залежності від зміни рухливості змін  $j$ .  
Взаємодія (розділення): на домішках і фреонах

$$1: \mu = C_1(T)^{-3/2}$$

$$2: \mu = C_2(T)^{5/2}$$

Нехай  $\epsilon$  гіор Шоткі і р-п перехід:

$$j = \frac{eD_n n p}{L_n} [e^{eV/kT} - 1], \text{ оцінимо } j \sim 10^{-4} \text{ A/cm}^2$$

де р-п переходи.

Для діоду Шоткі:

$f_s \sim 10^{-5}$  - вирашу не получили, бо користувалися діодною теорією ( $v_n \ll v_r$ )  
 Оцінемо це за диф. теорією:

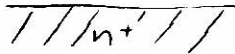
$$j_s \sim \frac{e n_i \mu_{kt} (1 - e^{-eV/kT})}{e^{eV/kT} \cdot \frac{dx}{dy}}$$

$j_s \sim 10^{-7}$  - тобто є вираш в фак струмі.  
 $10^{-6}$  - гарантовано, тобто краще ніж для р-п переходу

## Триповерхневі шар в мікроелектроніці.



n



Підготувати відповідний епітаксіальний шар n/n на підкладці. Епіт. шар 10мк  $\Rightarrow$  процесам, що відбув. в підкладці, можна зникт.

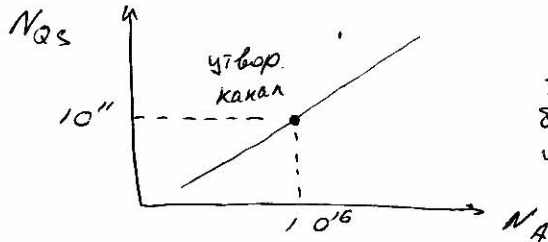
/// - ізолятор: для Si можна викор оксид. Цей діелектрик створює велич зон потягів, за рах того, що на його поверхні від'ємний заряд. Якщо  $\mu$  в діел. +, то може утворитись канал, що недопустимо



$N_{as} \sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$  - критична густина електронів, при якій утвор.

канал.

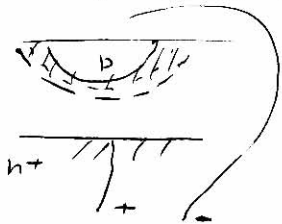
$N_{as}$  залежить з р-області



тобто чим більше  $N_A$ , то можна більше  $N_{as}$

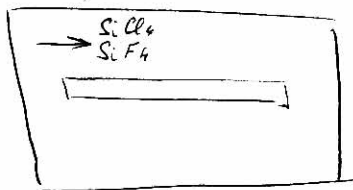
$N_{as}$  - концентрація надлишкового заряду.

Елементи літє собою можна створити подавши певну кількість заїрку напружу

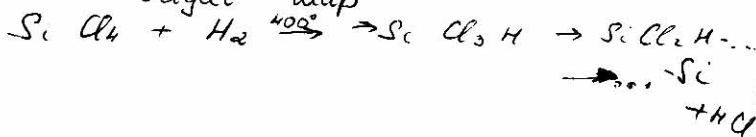


МП - збїднений стан

За МПЕ рїст їде з А/С, але цей процес дошть коштуєвий.



Підкладинка розміщується в реакторї. (р ~ 10<sup>-3</sup> мм.рт.ст.) Якщо прокачувати газ і створити умови виняду результатїв реакції на поверхню, то на поверхню оїдає шар

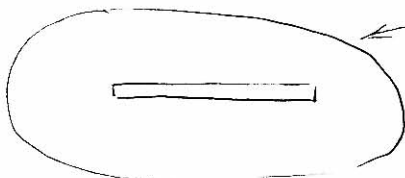


## Епітаксїальні плївки.

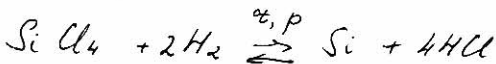
07 03

Особливїсть ЕП: продовжує симетрію кристала (підкладинки).

Реактор - кварцова труба



Прокачують газ.



Реакція відбув. Ђїне поверхні підкладинки, яку підтримують і цією температурою керують на прикладї реакції. Цей спосїб дає можливість створ. чистї плївки. За доп. ВЧ поле можна створити плазму в серединї реактора  $\Rightarrow$  плазмова чистка поверхні. Для того, щоб увїйти в градку треба, щоб  $E > 20 \text{ eV}$  - кїн. енергія іона.

Якщо  $\angle$ , то чистї більший кут  $\angle \Rightarrow$  можна взяти більшиї енергїї.

Ел-на гармата + дифракція ел-нів на поверхні-дослідницькі поверхні.

Така технологія дозволяє мувати плівку з газової фази. Пр. додамо  $2PH_3 \xrightarrow{t} 2P + 3H_2$  і буде  $P$  осідати на поверхні  
Можна додавати  $B_2H_6, AsH_3$ .

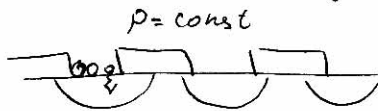
Треба отримати суміш:  $10^8$  на 1 атом домішки такої точності неможливо досягти при випливанні кристалу з домішки

Можна рости плівку і на кристалі (при ньому дошть гарячій поверхні атоми Si займають не екстремально вигідні місця).

14.03

## Мування із неодміною дифузії

- це те дифузії, в якому кон-ція домішок є сталою (не змінюється з об'є. факторами).



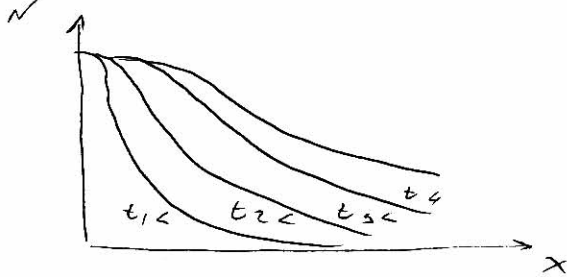
На поверхню осідає домішка, а потім потрапляє в глибину матеріалу, а на її місці приходить нова домішка з газу. Поверхня - дифузії з неодміною.  $x$ -стю.

К-сть домішок: 
$$N(x) = 2N_s \sqrt{\frac{D}{\pi t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$
$$\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = \int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} \exp(-z^2) dz$$

Це отримується з:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = D \frac{d^2N}{dx^2} \\ N = \text{const} \end{cases}$$





Це справедливо для газоподібного дифузанта.

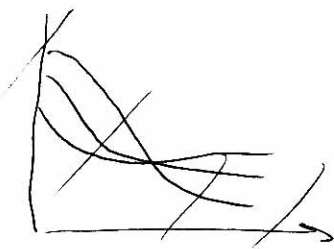
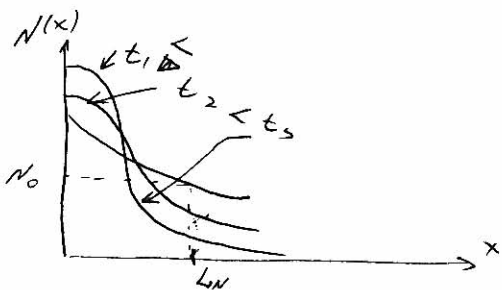
Для рідких і твердих дифузанти в картки децю змінюють, бо немає  $N_s = const$ . Також

дифузії буде з одменним енергоном. Це оти-сється

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = D \frac{d^2N}{dx^2} \\ Q = \int_0^{\infty} N(x) dx = const \end{cases}$$

Розв'язок цього:

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi} \sqrt{Dt}} \exp \left\{ -\frac{x^2}{4Dt} \right\}$$



$$L_N = \sqrt{4Dt} \left( \ln \frac{N_0 \sqrt{\pi Dt}}{Q} \right)^{1/2}$$

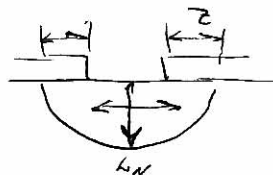
$D$  має активізаційну залежність від  $T$ . Тому треба значно стабілізувати  $T$

Як газ використовують  $BH_3$ ,  $PH_3$ ,  $P_2H_5$ ,  $-2034$   
 $BBr_3$ ,  $POCl_3$ ,  $B_2O_3$ ,  $P_2O_5$

рідини

Т.Т.

Али дифузії йде і внашаму напрямку  
 $z \approx 0.7 L_N$

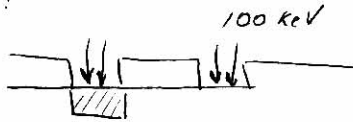


$$D = D_0 \exp \left( -\frac{E_a}{RT} \right) \approx 2.5 \text{ eV}$$

	As	P	B	Sb
$N_{max}$	$20 \cdot 10^{20}$	$13 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{20}$	$96 \cdot 10^{20}$
T	$1150^\circ C$	$1150^\circ C$	$1200^\circ C$	$1200^\circ C$

### Уонне пшубанна

Ак мтогу пшубанна мотна вкор. іонну ішплант. уію:



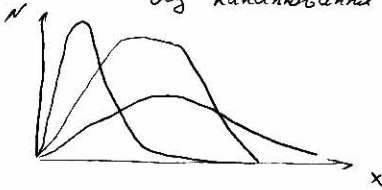
Прошрок  $SiO_2$  пшук не пробивае, тому маємо, що розпшубанна не буде.

В залежності від того, як повернемо поверхню, будемо мати різне проходження іонів.

Процес каналювання - між площинами (між атомами) іон може проодити значну відстань і не пшубати приповерхнєві шари.

Пшануть позбутися цього ефекту.

Це пшубання описується ф-цією Гірсона: без каналювання

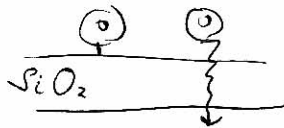


Мотна створити крутий фронт

Для того, щоб виростити сухий оксид

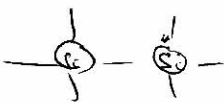
$SiO_2$  0.5 мкм  $1000^\circ$  5 годин на поверхні Si

Ую саму товщину при вологості мотна отримати при  $1000^\circ C$  за 20 хв.

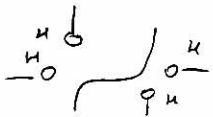


Окиснення йде на поверхні  $SiO_2$  і Si, тобто кисень повинен пройти шар  $SiO_2$ .

Сухий - оксид більши якісний.



Бівакансія



Водень поєднує напружені структури. В ці місця потрапили  $\text{O}_2$  і окислює  $\text{Si}$ , але всі  $\text{Si}$  не кристалічний, а утворився розривлена структура.

Вологий оксид не підходить для затворів МДН-ІУ-рів, бо напруження пробиває мала.

### Хімічне травління.

- це є це розкладання роговину.

Плавикова, азотна, ортофосфорна

МГ



травління.

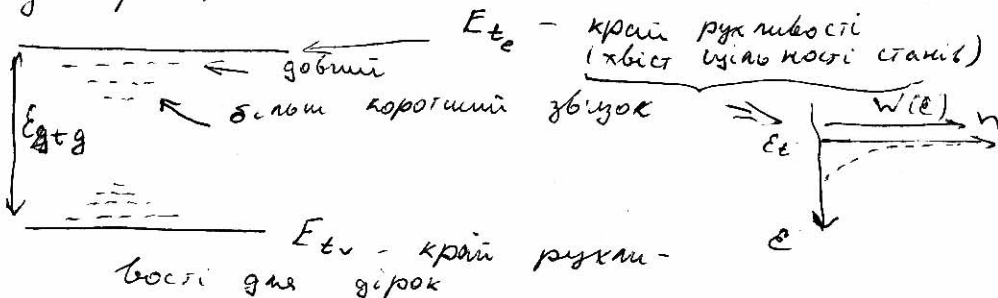
Потрібно для того, щоб травити саму роговину  $\text{Si}$ , і  $\text{SiO}_2$  (тобто зняти маску)

На травінні впливає кону-ція, ультразвук.

### Отримання аморфного кремнію.

21.03

Полок побудував кластер з 200 атомів  $\text{Si}$  без трансляційної симетрії (тверда роговина, аморфка). Кут зв'язки зв'язків  $20^\circ$ . Аморфний кремній в газотранспортному процесі отримати дуже дешево. В аморфному кремнії зона теоретично не справджується. Користуються краєм роговності (перехід від енергій).



Величчина квазіперервний спектр щільності станів.  
Де щільність станів велика, там рухливість  
велика.

$E_g$  - зазор рухливості.

Сам матеріал  $n$ -р, але в зоні є трапля  
дозволені рівні.

Ширина забороненої зони більша, ніж кристаліна  
столука  $Si$  +  $H$ , можна за рах. концентрації  
 $H$  можна змінювати  $\mu$ ,  $\sigma$ . (р і n - тип  $n$ -р).  
 $Si$  +  $H$   $Si$  - аморфний працює на невеликих  
частотах.

$Si$  - а використовується тоді, коли треба  
написувати поверхню  $Si$  - кр.

до цього більше процес окислення,  $Si$  - кр.  
 $O_2$  кисень не проникає до  $Si$  - кр.

## Травлення

селективне травлення - травлення тільки окремо  
го матеріалу, а інший - не пошкоджується

Анізотропне травлення - при повільному травленні  
можна впливати зовн. факторами (Т-ра, ультразвук),  
що впливає на швидкість процесу.  $O_2$   
швидкість травлення в напрямках (010),  
(001), (111) - мають різну швидкість.

Тр. (001)  $Si$  + ультразвук - фасет



Літографія - нанесення на поверхню малюнку. Маска + фоторезист = малюнок

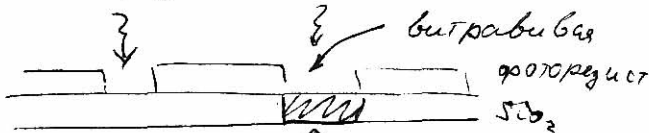
негативні  
послаблюється

позитивні:  
зміцнюється  
під дією світла.

Отримані три фарби (маски): на прозорий матеріал наносимо фоторезист; світло і впливниме фоторезисту з отворами  $\Rightarrow$  утворення "вікон" в сілі  $\Rightarrow$  маска.

Щоб створити вікно розміром 1 мкм, то робимо образ на 10 см x 10 см дуже точно. Потім оптичними методами зменшуємо зображення і отримуємо.

Фоторезист наноситься на  $SiO_2$

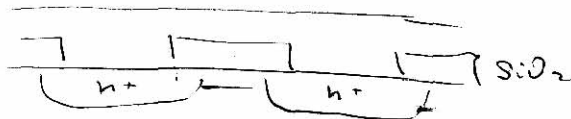


Потім селективним травленням витравлюємо  $SiO_2$ , потім знімаємо фоторезист;



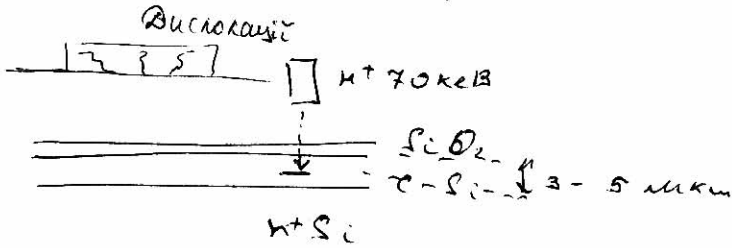
Потім можна чистити

Потім наносить фоторезист. Задача зупинення фотомаски (розміри точок).

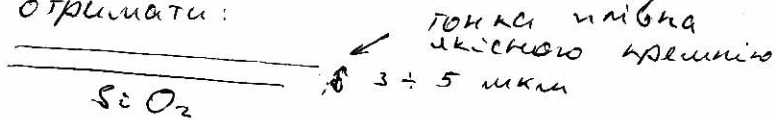


Малюнок можна наносити скануючим електронним мікроскопом краща роздільна здатність при меншій робочій довжині хвилі.

# Технологія SOI (кремій на ізоляторі).



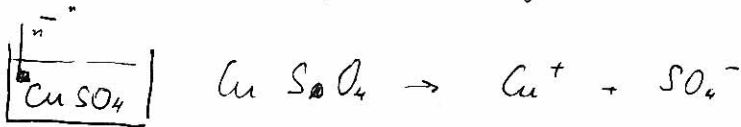
Возень імплантується на певну глибину. Якщо імплантуємо багато водню, то поверхню можна скопати і отримати:



28.03

## Напіпровідникові з'єднання на основі

нанотрубок. Ці трубки можна позиціонувати за допомогою атомного або силового мікроскопа за рах. полів. Прієднання роблять за допомогою нанесення металевих плівок (електроліз, електрохімія - реакція іде при певному потенціалі).



Аналогічний випадок при нікелюванні. (Ni(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) Соли вибирають так, щоб кислотний залишок не травив скли. Але металеву плівку можна отримати вже на провідник!

Якщо осадити тільки на діелектрик, то треба нанести підшарок провідника склиним методом (вакуумною напильни), а потім використати осадження.

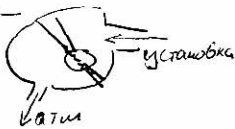
Швидкість велика  $\Rightarrow$  можна створити товсті плівки: 10-100 μm / год.

Швидкість нарізання залежить від струму.

Адгезія — можливість утримуватися на поверхні.  $Va, Ni$  — дуги добре тримаються на  $Si, SiO_2$ .  $Va$  — для контактів, які працюють в широкому діапазоні температур ( $\sim 50^\circ A$ ) —  $200^\circ A$ ).  $Si$  не тримається на  $Si$ .

Способи нанесення металу:

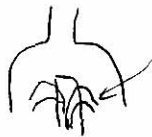
— термічне наплення: відбув. в вакуумних установках  
Відкачка: форвакуумна (механічна) —



так вакуум одметується тиском парів масла  $\sim 10^{-4}$  мм рт. ст.

сорбційні насоси: відкачка керамічна поверхні <sup>цоліт</sup>, яка в залежності від температури він вибирає молекули газу (сорбція), <sup>чи</sup> <sup>фактор</sup> за рахунок пористості  $S \sim 100 m^2$ .

дифузійний насос:



через сопла викидається пара високої

тиску, яка вибирає газ, а потім уносить його з собою. ця тип р — одметується випаровуванням ретовини.

Лонні насоси

випорожнюючі: всі атоми, що потрапляють до криостату, не віддають накріопакець і віддають всю кін енергію



криостат. Молекули не можуть вийти

Для напівкило плівки достатньо  $10^{-6}$  мм при  
випомірю, щоб не було парів масла



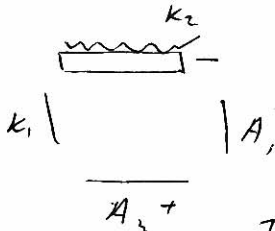
Стираць розігрівается і  
потік атомів осідають на  
підкладку.

Щоб дослідити товщину,  
використовують метод свідку: контрольна пластикка  
пороз. Зміна кварцевого резонатора —  
напівки на поверхню  $\Rightarrow$  зміна параметрів  
резонатора.

Проблема: напівки вольфраму (розігрів  
ють електронним пучком)

$\downarrow$   
20 кВ - напруга.

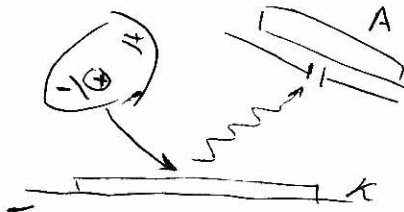
Можна застосувати метод катодного  
розпилення. Якщо подати певний потенціал  
на підкладку, то розпилений матеріал  
краще осідає.



$k_1, A_1$  - створюють  
плазму розряду

$k_2, A_2$  - напівки іонів  
в певному напрямку  
це система - плазма-хі-

мічна.



Якщо підкладку  
закрили, то ми  
прогріли катод,  
а потім, коли  
йде шета ретовника  
можемо застосувати

відкрити. Таким способом можна  
розпиляти і діелектрик.

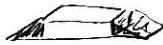


Анодування — впускаючи  $O_2$ , він підє до аноду, а там утворюватиме оксид. Це створить оксиду на анаді.

## Технологія тонкоплівкових гібридних інт. схем.

— це нашивні тонкоплівкові ел-ти + активні елементи.

Безкорпусний елемент ставиться на плату і припаюється:



На платі можна створити заглиблення, в яке і вставляємо ці ел-ти.

Сам ел-т замуджений і підітрі -  $\downarrow$

випаючи його само спадаєтьє

Безкорпусні діоди ↑, та транзистори, але в цьому вже з контакти.



контакт

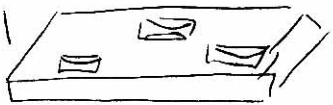
Розмір контакту 200 мкм

Контакти децю розкосі для полегшення під'єднання. Використ. кульковий монтаж:

на контакти напаюється кулька Sn-Sb, а на платі готують площадки з заглибленнями

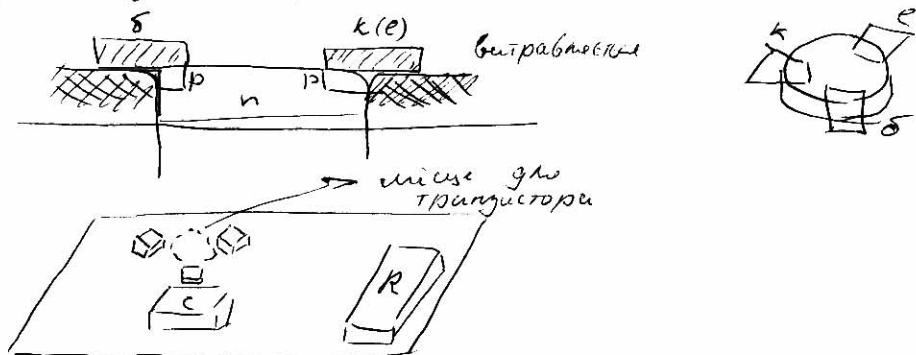


Flip-on-chip - перевернутий



плата. Транзистор перевернутий і опускається до заглиблень.

Балачний монтаж з контакту робить навіску балку



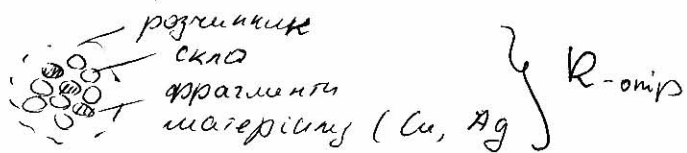
Елементи товстоплівкових УМС.

Паливні ел-ти з великою потужністю

Товста  $\rightarrow > 10 \mu\text{км}$  - такі плівки можна створювати за доп. трафарету.

Взяли універсальний наповнювач, розчинники. В них  $\rightarrow$  додають певні елементи, щоб отримати необхідний матеріал (пр. провідний порошок срібла, наповнювач - чашол скла кулька  $2-3 \mu\text{км}$ , розчинник - толуол)

Матеріал



Цю пасту наносять на поверхню матеріалу і утворюється горілка

Як правило, підкладочка алюмова або сапорова, щоб позбутися дифузії підкладки в пасту.

Шерховатість підкладки  $\sim 25-50 \text{ нм}$

Якщо додати титанат барію (сегнетоелектрик)  $\Rightarrow$  конденсатор.

Резистор  $Cr, Ni-Cr$ .

Потім підігрівасмо  $\Rightarrow$  розчинник випаровується  $\Rightarrow$  формування при високій  $T$ -рі (зліпання шариків).

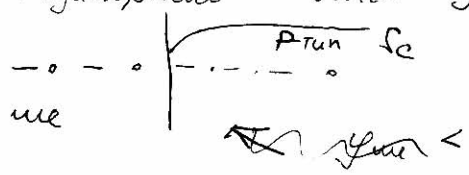
Гідкладінку можна розчинити і тоді залишаться тільки товстий шар. Як наповнювач використовують порошок скла (фритта). Розчинник: може бути різний, але скло в ньому не розчиняється. Для резисторів додають порошок срібла, хрому. Написання ел-тів відбувається через трафарет, а потім знімають "нажеле" зайве, цим і самим можна контролювати товщину.

04.04

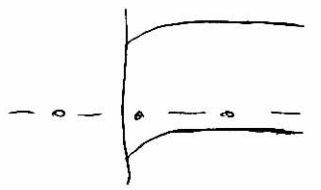
На трафареті у отворі є сітка, що дозволяє уникнути ситуації неоднорідності півки після зняття ракелю.

## Контакти.

Лінійний контакт тоді, коли виникає антуанорний велик зон.



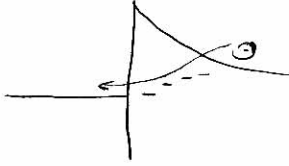
робота виходу  $U_{se} < U_{me}$  - занорний анти



Як правило, роблять лінійні контакти до р-типу гідкладінку.

Це потрібно для ізолювання ел-тів за рах. р-п області.

Тюді треба мати щільний контакт до n-типу високошвидкісної підкладки. Тоді створюють таку велику біть струму, який би не мав ескравих випромінюючих властей (альтернативні струми): вкати по-кальві стани, по яким ел-н побуду бар'єр може рухатися 2



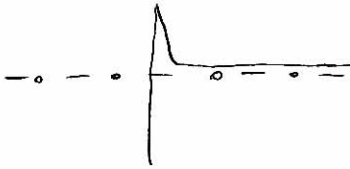
Щільність станів на великій зоні збільшується  $\Rightarrow$  тому сила в зоні бар'єру викликають альтернативні шми проточу струму. Це срибковий механізм переносу струму.

Теорія Мотта описує цей механізм. Особливість срибкового струму:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left\{-\left(\frac{I_0}{I}\right)^{1/4}\right\}$$

$\sigma_0, I_0$  залежить від матеріалу і щільності станів. В цьому випадку  $\sigma$  не має активнійму залежності

Випадок омного контакту з сильною ванни чіпр з великим бар'єром на поверхні.



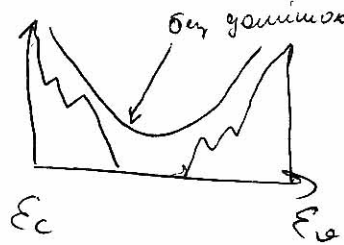
Для сильноомовного чіпр ОЛЗ маленька  $L = \sqrt{\frac{2 \cdot \varphi_0}{e N_d}}$

Для  $10^{19} \text{ см}^{-3}$   $L = 200 \text{ \AA}$

Мом в ОЛЗ  $10^8 - 10^9 \text{ В/см}$ . Відбувається тунелювання  $\rightleftharpoons$ .

Якщо додавати до a-Si H маємо

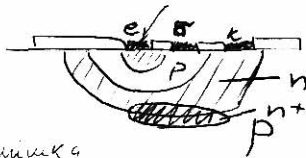
Тоді можна контролювати густина станів.



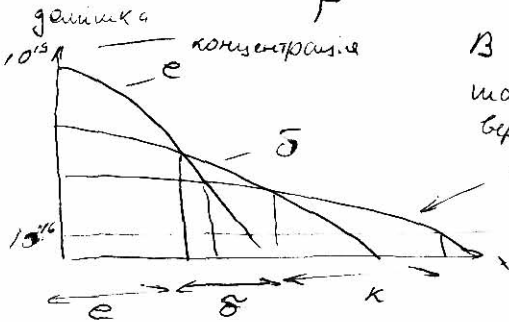
- Ознаки  $n$  і  $p$ : - наявність  $E_g$   
 - провідність в певних межах  
 - наявність менш помітних.

## Елементи УМС.

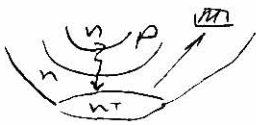
Біполярні транзистори (вертикальні):



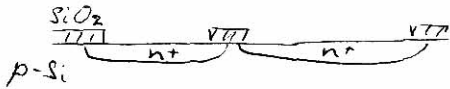
е-ни мають більшу рухливість  $\Rightarrow$  гранична частота більша ніж в р-р.



В  $\nabla$  тр-р є скритий шар  $n^+$   $\Rightarrow$  тоді він стає вертикальним,  $n^+$  має збори інжектованих носіїв прокова підкладки

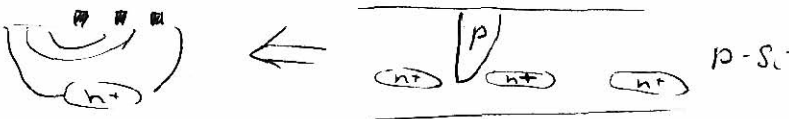


Цей тр-р робить в 2 стадії пелувинки: спочатку пелують пластівку р-Si.



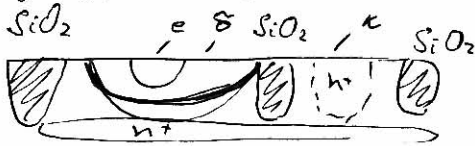
$SiO_2$  зтрапляється,

а потім вирощується епітаксійний шар р-Si в якому вже буде дудуватися тр-р.



Міні копним транзистором пелують р-область, щоб ізолювати транзистори один від одного

Зоннарни технологија - прокиснио  $SiO_2$   
 змиць зомцйкнх р-областй. Кнмь зоманеться  
 днфузйей. Зомцн боковнх поврхон  $SiO_2$ .



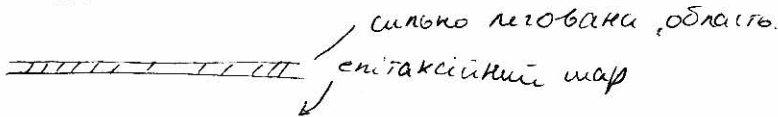
Значно зменшнвсь  $R_k$   
 опр колектору.

18.04

## Зомцн днелектрнком.

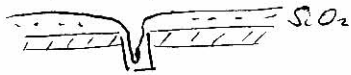
Зонан-зомцнйя й тастнчно днел, й тастнчно  
 р-п перекздан.

ЕПІК - процес:



пндрклад.

$\alpha-SiH$  або  $p-SiH$



Потнм внтравлють емкн

окуснюють, а потнм на  
 цей окснд накусють  $\alpha-SiH$ ,  
 $p-SiH$

10, 100 нкм

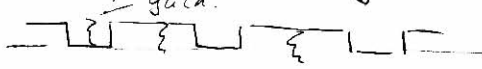
Далн пндркладнчка зшлфруеться й перевреться



На цй структурн будують далн ~~фра~~ ел-тн.

ЕПІК дозволе на звнзайнн пндркла-  
 днцнй  $Si$  внрошувать зометор.

Структури КНС (кремній на санфрїрі):  
 санфрїр має таку структуру, що дозволяє  
 вирахувати Si (схильність поверхневих інтерфейсів).  
 При рості монослої виникнуть дислокації



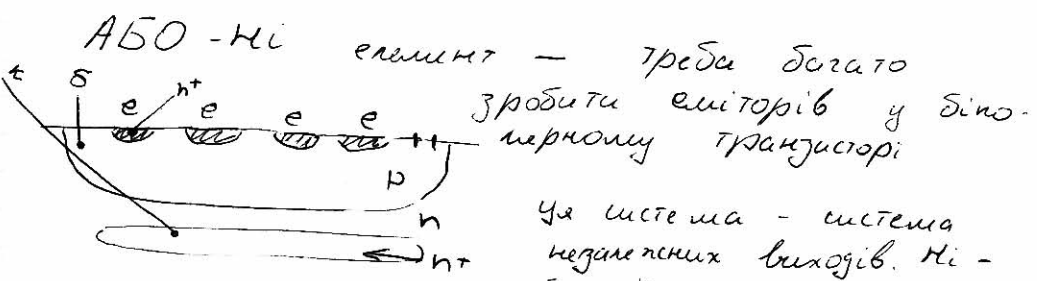
Потім витравляють кінчики,  
 куди будуть висловлювати

ти дислокації (ідеальний з'єднок сильніший за  
 неідеальний, тому при  $\uparrow T$  дислокація буде  
 мігрувати, бо вигідніше її з'єднок Si-Si).  
 В процесі  $\uparrow$  росту можна мігувати Si.

КНУ (кремній на ізоляторі SOI).



Діють товщини півки 0,5 мкм.



Ця система — система  
 невеличких виходів. Ні —  
 бо підключення зі спільним  
 емітором — інвертують сигнал.

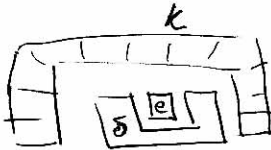
Ця ТТЛ-логіка (воки має недомік  
 великого струму)



Інша ТТЛ та Ш — логіка ТТЛ + діод шоткі  
 ТТЛш

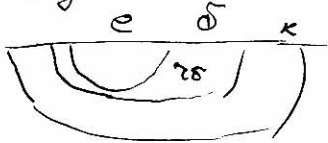
Можна створити багатокомпонентний транзистор,  
 викор. в пам'яті. Це зворотний (обернений)  
 транзистор. В замкненості від того, куди

Подано напругу (який колектор), то той колектор і витягне струм. Це стало можливим після відкриття "глибокої" дифузії - переважання дифузії в одному напрямку за рахунок кристалграфічного напрямку.



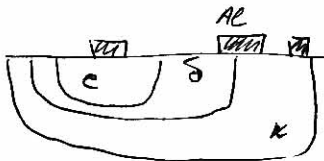
← Плантоколекторний транзистор.

Супер β транзистор: раніше таке МДН транзистор з високою ефективністю не було ( $\approx K \approx 1000$ ). Треба зменшити втрати інжектованих електронів в базі



n-p-n

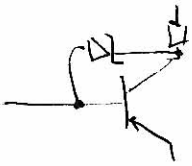
Товщина переходу еб 0,1 мкм, а це дуже багато, бо йдуть дифузійні процеси. Є ефект висото вхвильового фронту (якщо про фронт мовити), який дозволяє розділити ці два фронти. Для  $N = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  і  $S = 4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  і 0,1 мкм маємо лише 2 шари домішок бази. Треба навчитися керувати цими 2 шарами. Такий тр-р дає  $K = 5 \cdot 10^3$ . Виникає такий ефект: мові, що були найближче бази в базі, а потім різко закрили тр-р, то мові це замилюється в базі, щоб цього поводитися (підвищити розшуктування заряду) тр-р з дарером шоткі.



n-p-n

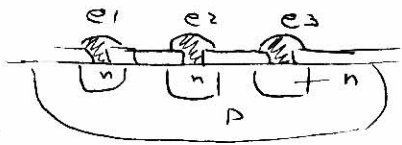
Контакт захопить на б-к перехід. Всі мові, що потрапили в колектор при закритті напруги, потрапляють саме на цей АВ - випрежмлений контакт, тим самим розшуктування прибиваються з границею л.



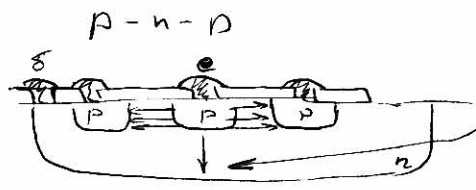


- схема цього тр-ра.

### p-n-p - транзистор



Якщо один є закриваємо, а інший відкриваємо, то у нас з'являється горизонтальний транзистор.

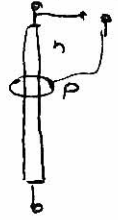


↓ - збитковий струм, який можна знизити закрити п-р переходом підкладинки.

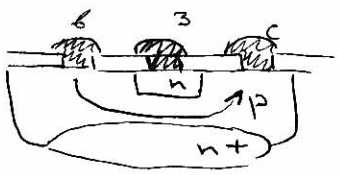
Це і буде горизонтальний тр-р.

### МДН - транзистори.

Канальний транзистор :



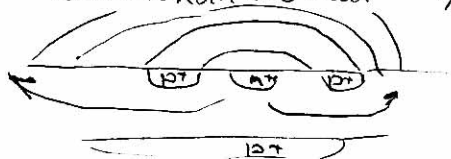
p-n переходом можна передати канал n-типу, по якому тече струм. керування струмом. Вентиль річ - використ. основні коий + ефект поле.



Струм б → с керується напруженою на затворі, а сам каналом.

Можна створювати  $p^+ p^+ n^+$

### Багатоканальний транзистор.



Тобто для ↑ потужності ↑ площу.

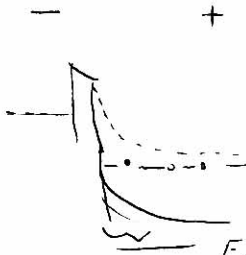
Недолік - інерційність, бо працюємо на неосновних носіях.

25.04

МДН: +; - швидкоуси  
- великий коеф посилення по потужності



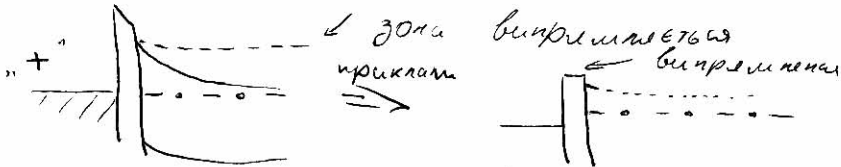
$\Delta \phi_{zs}$  - зміна поверхневої провідності  
за рих. прикладеного поля



канал не вдається побудувати

$E_x$  наближається до великої зони  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  нагнітання дірок на поверхню  
(дірки - неосновні носії). канал створено

Треба, щоб працювали на основних носіях



випромінюють електрони!  
Можливо взяти рівня Фур'є в зону провідності

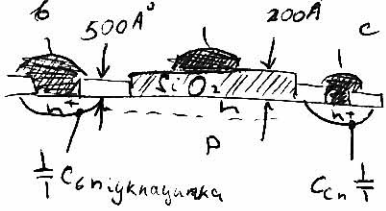
Порогова напруга

$$U_p = U_{FO} + U_B$$

↑  
поле, щоб створити плоскі зони

↓  
бар'єр

Треба, щоб поверхня провідність переважала об'ємну



$$U_p = 1 \div 1,5 \text{ В}$$

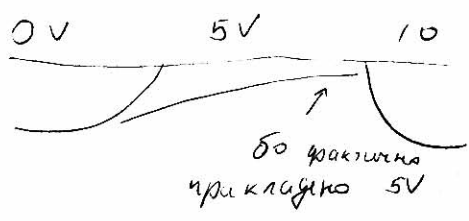
Щоб не подавати цю постійну змінювану  $U_p$ , то поверхня  $p$  слабо митують.

Напряма безіскри - напруга, що закриває канал ( $- 1 \div -5 \text{ В}$ ).

Важливо, щоб підзатворний електрик був якісним і тонким. Але якщо тонкий, то велика ємність, то можна низькою напругою зарядити більше заряду  $\Rightarrow I_{\text{пол}} (U = Q/C) \approx 100 \text{ А}^\circ$

Є недолки: бар'єрні ємності  $p$ - $n$  переходів - паразитні (частотні характеристики)

Якщо  $n^+$  потрапляє під  $\text{ScO}_2$ , то створ.  $C_{зв} \rightarrow C_{зс}$  (паразитні)



Якщо  $U_{зв} > U_{с}$ , то канал перекривається, тому ми можемо прикладати тільки дещо таку стоківу напругу.

$U_{зв} = U_{св} - U_p > 0$  - умова експлуатації даної структури.

$$I_c = v \left[ (U_{зв} - U_p) U_{св} - \frac{1}{2} U_{св}^2 \right]$$

L деякий коеф.

$C_0$  - ємність підзатворного діел.

$$v = \mu \cdot C_0 \frac{z}{L}$$

z - ширина каналу  
L - довжина каналу



$\mu_e > \mu_p \Rightarrow$  величине канал з електронів

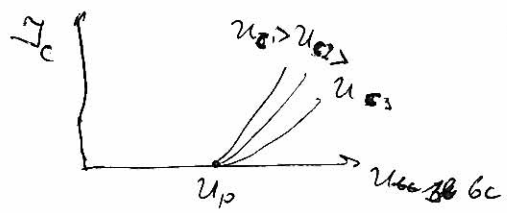
~~$L = 5 \mu m$~~   $z = 5 \mu m$

$b = 300 \div 500 \text{ A/V}^2 \text{ cm}^2$

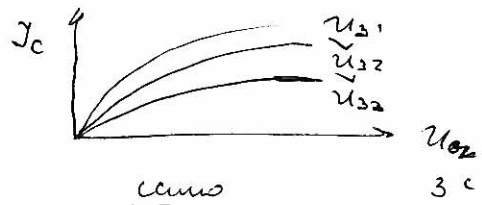
$\mu_{зв} = \left( \mu_{св} - \mu_p \right) -$  умови виникнення горловини

↑  
підставимо і отримаємо

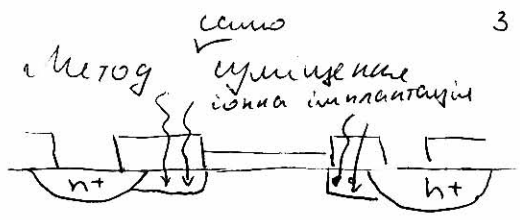
$I_c = \frac{b}{2} \mu_{св}^2 -$   
прохідна характеристика



Виток з'єднується з підкладкою  $\Rightarrow$  поведінка вимірює  $S_{вп}$



- перелізна  $x$  ка  
на величине струму -  
облипки каналу.



метод  $\checkmark$  іонна імплантація

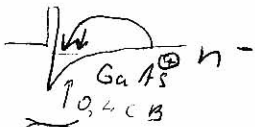
імплантацією ми виключаємо перекриття.  $n^+$  і заборони затвору  $\mu_2 \mu_{зв}, S_{зс} = 0 \sim 0,01 pF$

high electro mobility transistor

$\mu_{Si} - 3000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , а дані кристал руйнується

$\mu_{AlGa} - 10000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  - найбільше  
 $GaAs$

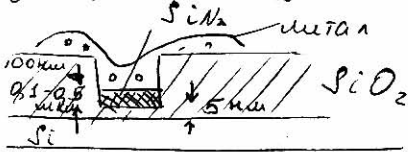
AlGaAs



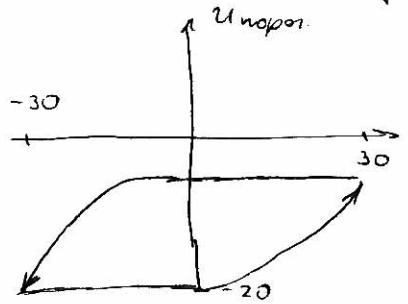
спраць - шар, який нічим не покривається, де можна отримати  $\mu \approx 50 \div 70 \text{ } 000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

МНОН - метал - нітрид - оксид - n-пр

16.05



Цей транзистор має особливу залежність порогової напруги від прикладеної до затвору зміщення



Пробойна напруга  $100 \div 120 \text{ В}$ , бо оксид товстий.

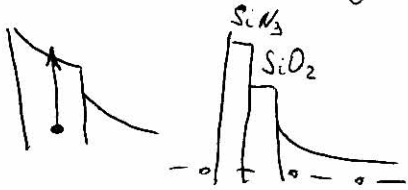
Якщо приклади "+", то ел-ни катедуються на границю  $\text{SiO}_2 - \text{SiN}_2$ , заряд захищається і утворює р-канал індукованого транзистора

Якщо "-", то ел-ни з границі уходять і  $U_{\text{порог}} \uparrow$

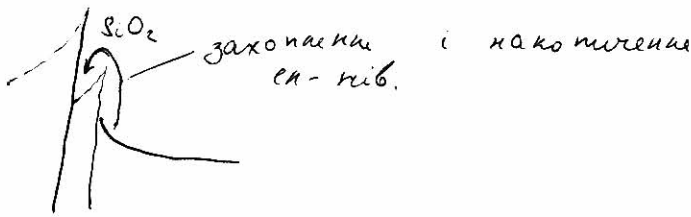
Тоді не використати метал з дієлектриків, а вкращають локальні рівні домішками, на яких ел-ни і осідають. Величезні ел-ни можна зрештою утворити ультрафіолетового освітлення (3 eV - енергія кванту жорсткого ультра-тУ):

$$E_{\text{SiO}_2} = 5-7$$

$$E_{\text{SiN}_2} = 11-13$$

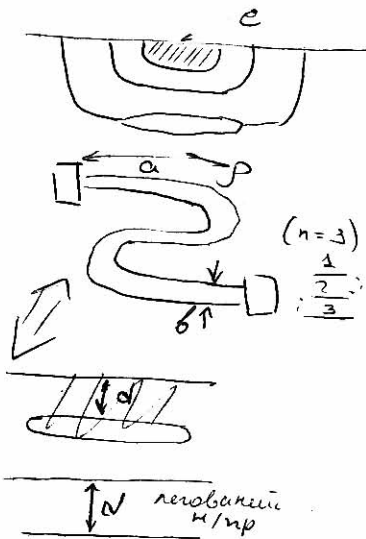


приклади напруги



## Виготовлення інших ел-тів:

Для  $n$ -провідникової ТС резистор повинен бути зроблений з шару  $n$ -пр.



емітер дає найменший нахил, а колектор — найбільший. Для отримання найбільшого достатку залишити колектор

$$R = \rho \cdot n \cdot \frac{a}{b \cdot d} \quad (\equiv)$$

к-сть витків      глибина

$$\equiv \underbrace{\frac{\rho}{d}}_{\text{опір шару (поверхневий опір) } R_s(\text{Ом})} \cdot n \cdot \frac{a}{b}$$

співвідношення сторін

Якщо  $n = \frac{a}{b} = 1 \Rightarrow R = R_s \Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  тоді, коли маємо квадратний канал — мінімальний нахил. Малий  $b$  а не зменшувати щоб уникнути значної похибки за рахунок неточності зраханні  $\leftarrow$  різний опір.

$$[R_s] = \frac{\text{Ом}}{\square}$$

(на квадрат)

Іноді переходять  $R_s \rightarrow \sigma_s$  :

$$R_s = \frac{1}{\int_0^a \sigma dx} ; R = n \frac{1}{\int_0^a \sigma dx} \cdot \frac{a}{b} , \sigma = e \cdot \nu \cdot n(x)$$

$$R_s \sim 100 \text{ Ом}/\square$$

$b \sim 1 \text{ мкм}$  - середній показник, який досягається без зайвих зусиль літотехнічним способом (визначається робочою довжиною лазера).

$$\frac{a}{b} \sim 1000 \Rightarrow a \sim 1 \text{ мм} \Rightarrow$$

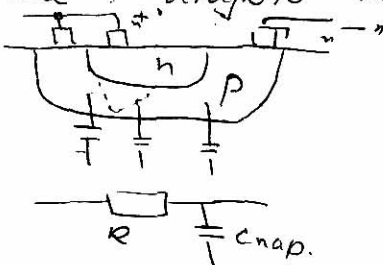
$$\text{max } R_s = 100 \text{ кОм} - \text{іноді}$$

Буде замало, тоді виконують виготовлення резисторів за півковою технологією. Це  $\uparrow R_s$  і  $\uparrow$  діапазони  $R$ . Але це вже буде гібридна схема ускладнення. Щоб все зроби́ти за доп. однієї технології, то викор пінг-резистор.



можна створити ефект перетискання каналу. Для закритої транзисторі можна створити  $R_{\text{max}} = 500 \text{ кОм}$ . Але розкид параметрів більший за  $\uparrow$  резисторів (проблеми геометрії, для пінг-резисторів - проблеми з тьмичними шарів, дифузійний фронт).  $\pm 30\%$ .

Але існують паразитні ємності:



Є певна границя частоти:

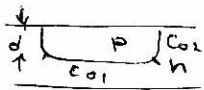
$$\tau = R C_{\text{пар}} ; f_{\text{гр}} \sim \frac{1}{\tau}$$

$$5 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-12}$$

$$\tau = 10^{-6} \text{ с}$$

$$f_{\text{гр}} = 10^6 \text{ МГц}$$

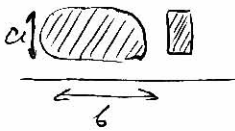
# Випробовання



емкостей.

Емність р-п переходу. Є також емність донної частини і з'єднання

$$C = \epsilon_{01} \cdot ab + \epsilon_{02} \cdot (a+b) \cdot d$$



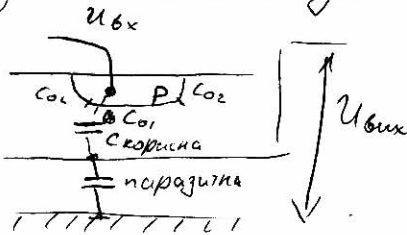
$$\epsilon_{01} = 150 \frac{pF}{mm^2}$$

$$\epsilon_{02} = 50 \frac{pF}{mm^2}$$

Для великих площ  $\epsilon_{02}$  вже не значно грає роль ( $a=b=1mm$ ), якщо  $a \times b = 10 \times 10$  ммкв, то значну роль грає бокова поверхня.  $C_{max} \approx 100 pF$

$$C \in [1, 100] pF$$

Але емність буде працювати годі, коли паразитна емність грає незначний вклад.

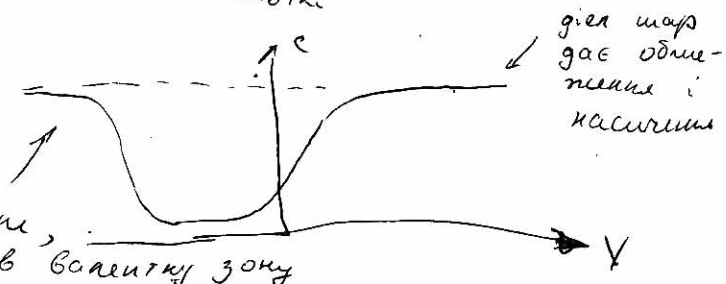
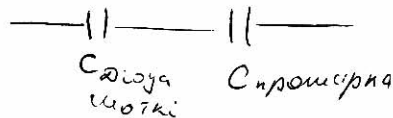
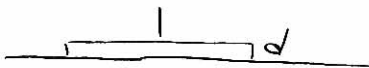


$$U_{вх} = \frac{U_{вх} \frac{1}{C_p}}{\frac{1}{C_k} + \frac{1}{C_p}} =$$

$$= \frac{U_{вх} \cdot C_k}{C_k + C_p}$$

Потрібно, щоб  $C_k \gg C_p$  тобто  $\delta$  на порядок.

## МДН-емкості.

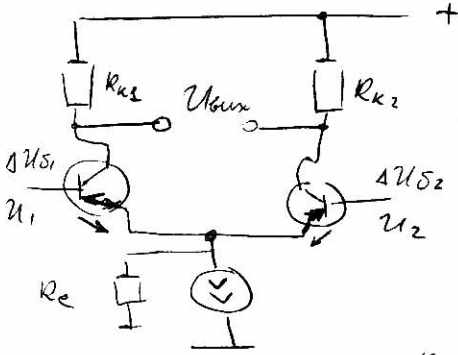


інверсія, захопання в вольтну зону



Для цієї ємності маємо  $C_S = 400 \text{ пФ/мм}^2$ ,  
а її змінює  $I \div 1,5 \text{ V}$ .

## Диференціальні каскади.



Цей каскад працює гарно тоді, коли маємо однакові транзистори.

При поєдві  $\Delta U_{б1,2}$  при однаковості  $\Delta I$  маємо  $U_{вх} = 0$

Для  $\Delta U_{б1} = \Delta U_{б2}$  - симетричний сигнал  $\Rightarrow U_{вх} = 0$ .

$$K = \frac{-\alpha R_k}{r_e + R_e + (1-\alpha)(R_k + r_b)} \quad \text{- для симетричного сигналу}$$

Для диференціального сигналу:

$$U_{вх} = \Delta U_{б1} - \Delta U_{б2}$$

$$K = - \frac{\alpha R_k}{r_e + (1-\alpha)(R_k + r_b)}$$

$$U_{сифр} = \frac{1}{2} (\Delta U_{б1} + \Delta U_{б2})$$

$$\text{Якщо } \left. \begin{array}{l} \Delta U_{б2} < 0 \\ \Delta U_{б1} > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow K = \frac{\alpha R_k}{r_e}$$

$$U_{вх \Delta} = K_{ас} \cdot U_{вх с} + K_{д\Delta} U_{вх \Delta}$$

$$U_{вх с} = K_{ас с} U_{вх с} + K_{с\Delta} U_{вх \Delta}$$

$K_{ас} < 1$  за рахунок великого  $R_e$   
 $K_{ас}$  - вплив симетричної складової на  $U_{вх \Delta}$

23.05

~~Умова~~  $K_{cc}$  - підсилення синфазної складової.

$$U_{bx \Delta} = \Delta U_{b1} - \Delta U_{b2} = U_{bx1} - U_{bx2}$$

$$U_{bx c} = \frac{\Delta U_{b1} + \Delta U_{b2}}{2} = \frac{U_{bx1} + U_{bx2}}{2}$$

$$K_{cd} = - \frac{\Delta R_k}{r_c} - \text{більший } \beta \text{ на } \beta$$

$R_e + r_e + (1-\lambda)(R_f + r_m)$

порядки  $\beta$   $K_{cc} = \frac{\Delta R_k}{R_c}$

Недолік - є брашинг вплив сигналів синфазною і  $\Delta$ . Якщо є неідентичність площей ( $K_1$  і  $K_2$ ), то синфазний сигнал прийде таким, але з'явиться псевдодиференціальний сигнал. З дискретних елементів можна підібрати та подібні елементи, тому буде  $\Delta K = K_1 - K_2$ .

$$K_{cd} = \Delta K = \frac{\Delta \cdot \Delta R_k}{R_c}$$

$$\frac{U_c}{U_{in}} = \frac{U_{cd}}{U_c} \quad |U_{cd}| < U_{in} - \text{можемо}$$

навіть працювати в таких умовах, бо  $K_{cd} \gg K_{cc}$  і буде відсутній перехресний

вплив складових ( $K_{cd}$  і  $K_{cc}$  - невеликі по відношенню до інших елементів).

$K_{cd}$  - не є цитевим

коэф. подавлення синфазної складової:

$$K_{пов.сс} = 20 \lg \left| \frac{K_{cc}}{K_{cd}} \right| = 20 \lg \left| \frac{r_c}{R_c} \cdot \frac{1}{\delta} \right|$$

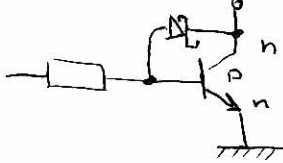
$$\delta = \left( \frac{\Delta L}{\Delta} + \frac{\Delta R_k}{R_c} \right)$$

# Цифрова техніка:

Отримала розвиток після створення ІМС, бо для працювання з цифрою потрібно багато ел-тів

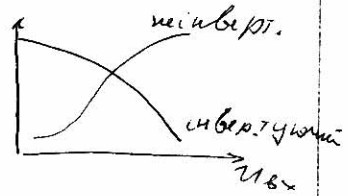
Логічні ел-ти.

Основний ел-ти - ключ:

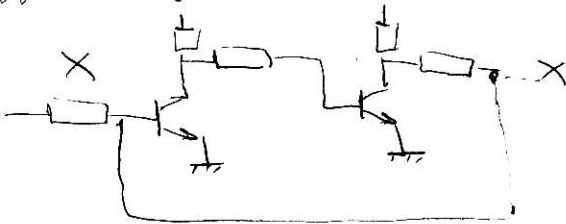


← інвертуючий

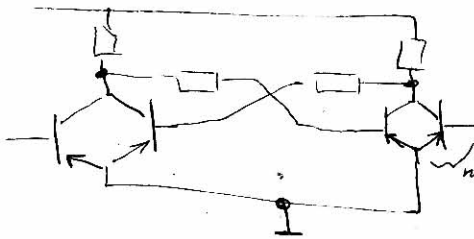
U<sub>вих</sub>



Діод безпечніше швидкість розсмоктування заряду в бас.



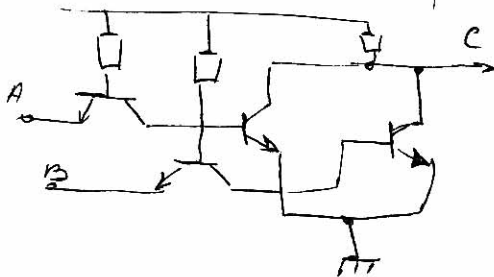
← Викликає  
дестабільна  
копірка



← тригер RS  
асинхронний.

потрібні для керування  
сталом

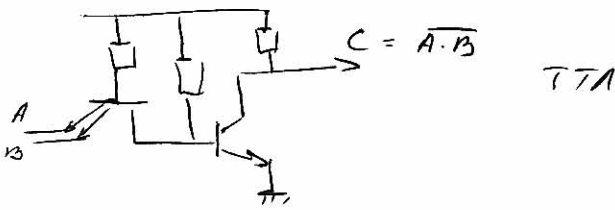
Логіки: ТТЛ, еміторнозв'язка



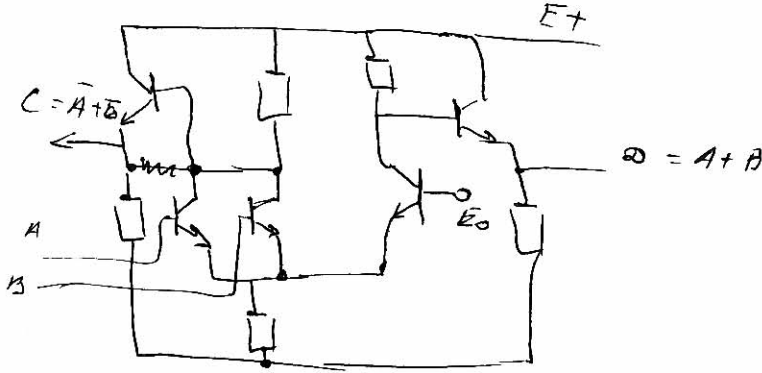
$$C = A + B$$

- АБО-НУ

ТТЛ

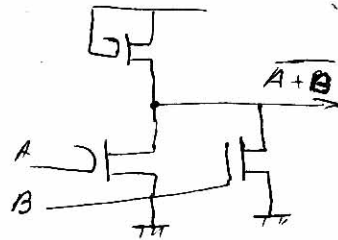
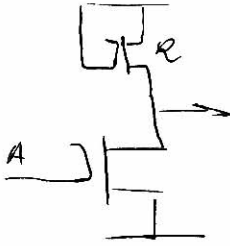


Емітерно-звезданка логіка:

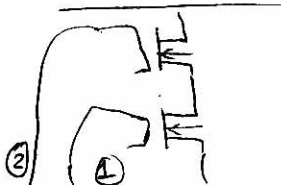


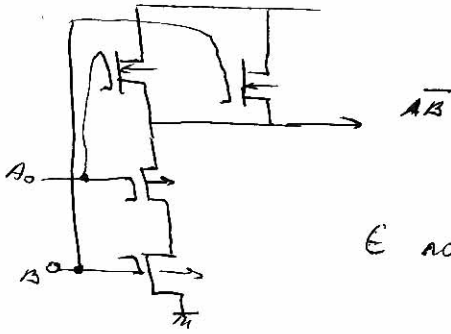
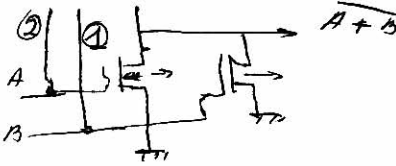
Логіка на МДН транзисторах:

елементарний ключ



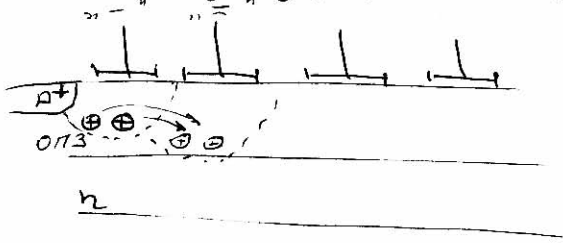
Викор. компліментарні пари для ↑ напруж. капацитансуючої спроможності;





Є логіки МОП  
кМОП  
компліментарна

Прилади зі зарядовими зв'язком

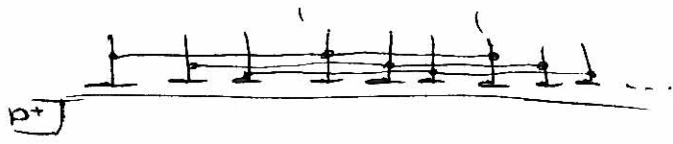


Транспортується  
пакет заряду  
полюсних  
носіїв.

Напрута, що прикла-  
дається, не повинна

створювати інверсний шар.

Трифазні прилади з зарядовим зв'язком

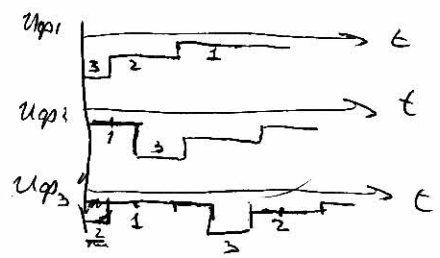


Закриття прикла-  
дени сигналу  
в 2 такти.

↓ періоду - 6 тактів.

$U_1, U_2, U_3$

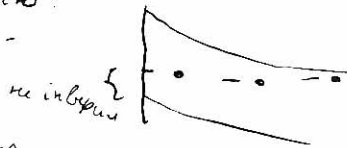
$U_1$  - фронтальний рівень  
 $U_2$  - рівень збурення  
 $U_3$  - рівень притягування.



Випли  $U_2$  повинен забезпечити надходження електронів з бокових електродів, а не з од'єму, тобто не треба створювати інверсію:

Є обмеження на час зберігання ( $U_2$ ).

$U_2$  - приймає найкращий вигляд з  $p+$  і здійснює заряд.



$T = 6\tau$ ;  $\tau$  - три ватісь такту.

Для частоти можна в час зберігання.

Перемишування відбувається в парні проміжки, а зберігання - парні. Момент  $\tau_{затис}$   $>$   $\tau_{зберіг}$  ( $\tau_{збр}$ ), тоді

$$T = 3(\tau_{затис} + \tau_{збер.}).$$

$$\tau_{затис} \gg \tau_{збр} \Rightarrow T \approx 3\tau_{затис}$$

$$f_{гр} = \frac{1}{3\tau_{затис}}$$

$\tau_{затис}$  обмежується розміром електродів  $\Rightarrow$   $\Rightarrow$  часом черетікання.

Заряд може захоплюватися на поверхні рівні оксиду  $\Rightarrow \Delta Q$  - втрата заряду.

$\frac{Q - \Delta Q}{Q}$  - діє до кінця стружтури

$$\Delta Q = e(N-1)$$

$N$  - кількість електродів  
 $\leftarrow$  втрата під кінцями електродом

проміжок між електродами  $\sim 1 \mu\text{м}$   $\Rightarrow \tau_{затис} \sim 10 \text{нс}$

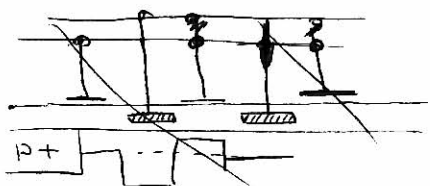
$f = 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ . Приклад працює на основних носіях.

$\max(\tau_{зберіг}) \approx$  час життя основних носіїв

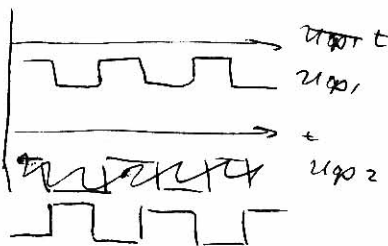
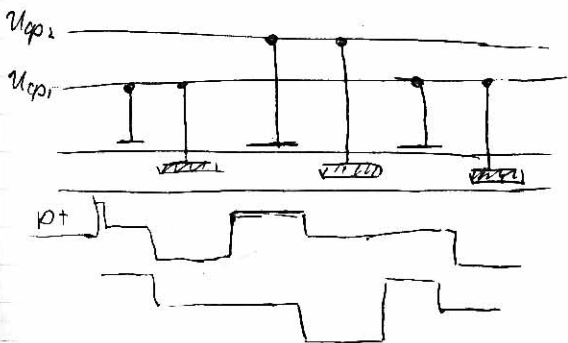
Для  $\tau_{зберіг} \gg \tau_{затис}$ .  $\Rightarrow T = 1 \text{нс} \Rightarrow$

$$\Rightarrow f_{гр} \text{ низька} = 300 \text{ Гц}$$

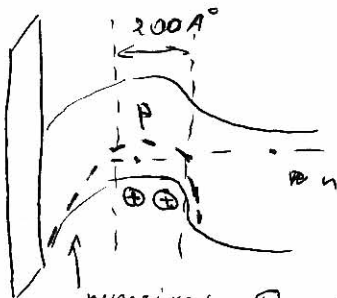
Шуми в ПЗЗ пов'язані із захопленням зарядів з ліній об'єму Борютовим таким чином: запускають а фронту, який заповнює ловушки і на фроні  $\sigma_{fr}$  за вимірюють заряд.



← двофазна система



ПЗЗ на основних носіях:



потенціал, що врівнює



період  $\oplus$ ,  $\cdots$  - висні зони, куди переходять  $\oplus$

ПЗЗ - лінії затримки з  $\tau_{затр} = T \cdot (N-1)$

## Надійність.

Надійність глибока визначена процесами, якими працює прилад; статистичний розкид параметрів елементів.

# Відмови:

- абсолютні (повні):  
приклад вугані не працює

- безумовні

- умовна:

зменшили коеф. підсилення,  
деградація

- умовна:

випід за певні мені  $\Rightarrow$   
 $\Rightarrow$  працює процесами  
деградації

іони ~~фрагмент~~ міграція - зміщення атомів,  
поява дефектів. Якщо структура має мало дефектів,  
то це перешкоджає переміщенню іонів.

Середній час роботи на відмову  $t_{сер} \sim 10^8 - 10^9$  часів

Ймовірність відмови  $P = \exp\{-\lambda t\}$

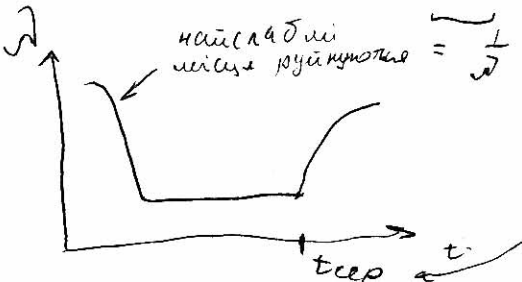
$$\lambda = \frac{1}{t_{сер}}$$

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot t}$$

- к-сть відмов  
к-сть ел-тів      - час за який відбув відмови

↑ температура можна припинити старіння приладу

$$t_{умов. за \Delta T} = t_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)$$



повізані з глибинами процесами



Пурпурна зума :

Якщо не витримати

$T$  і  $R$ , то можна не

знати, а утворити нову сполуку (інтерметалід  
 $AC$  і  $\neq Au$ ) і це ретовина з'єднає всі контакти.

