

ОСНОВИ МІКРО- і НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Лекція 09

МДН транзистори

Анатолій Євтух

*Інститут високих технологій
Київського національного університету імені Тараса Шевченка*

Основні характеристики

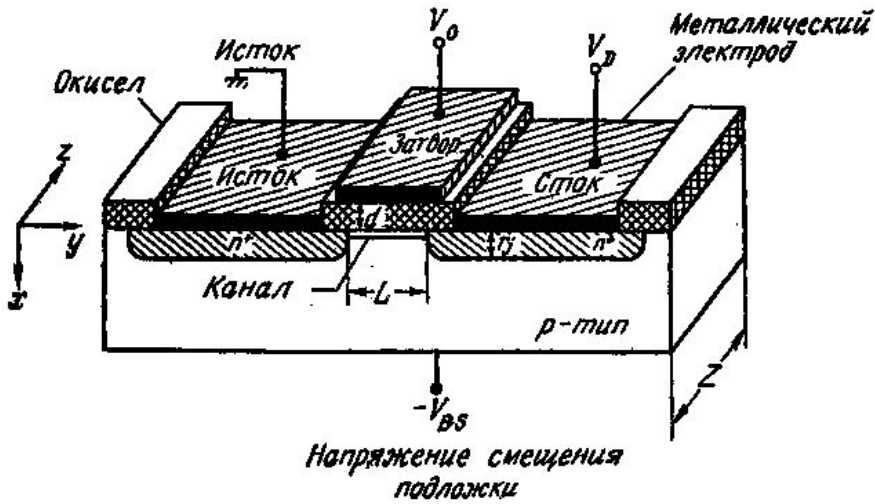
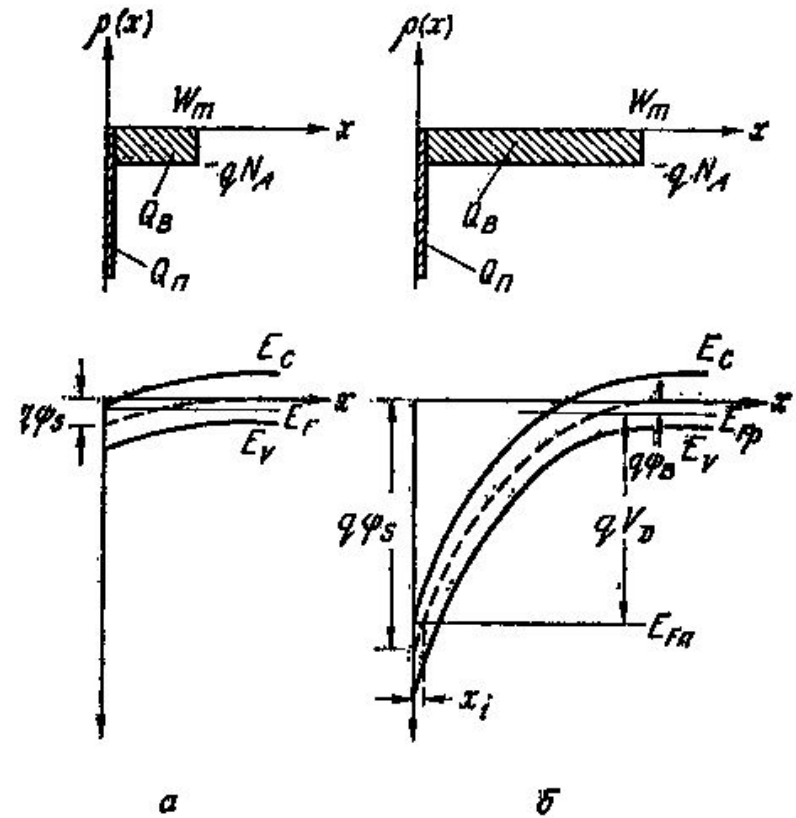


Схема структуры МОН транзистора.

В нерівноважному випадку товщина збідненого шару залежить від напруги на стоці V_D , а поверхневий потенціал, що відповідає початку сильної інверсії має вид:

$$\psi_s(inv) \approx V_D + 2\psi_B.$$



Розподіл заряду і зонні діаграми в інвертованій частині р-підкладки. а- при рівноважних умовах; б- нерівноважні умови поблизу стоку.

Співвідношення для зв'язку між зарядом інверсійного шару зарядом в збідненій області і напругою на затворі в нерівноважному випадку виводяться аналогічно рівноважному випадку з урахуванням двох додаткових допущень:

1) квазірівні Фермі основних і неосновних носіїв не залежать від відстані від границі розділу;

2) різниця між цими квазірівнями рівна напрузі на стоковому переході, тобто $E_{Fp} = E_{Fn} + qV_D$ (для р- підкладки).

Запишемо одновірне рівняння Пуасона для області просторового заряду, яка прилягає до стока для р-підкладки.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s}.$$

$$\rho(x) = q(N_D^+ - N_A^- + p - n), \quad N_D^+ - N_A^- = n - p. \quad n = n_{p0} \exp(\beta\psi - \beta V_D).$$

$$\beta \equiv \frac{q}{kT}.$$

$$E = -\frac{\partial\psi}{\partial x} = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F(\beta\psi, V_D, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}).$$

$$Q_s = -\varepsilon_s E_s = \mp \frac{\sqrt{2}\varepsilon_s kT}{qL_D} F(\beta\psi_s, V_D, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}).$$

$$F(\beta\psi, V_D, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}) \equiv [(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} e^{-\beta V_D} (e^{\beta\psi} - \beta\psi e^{\beta V_D} - 1)]^{1/2} \geq 0.$$

В режимі сильної інверсії повний заряд можна надати в виді

$$L_D \equiv \sqrt{\frac{kT\varepsilon_s}{p_{p0}q^2}} \equiv \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{qp_{p0}\beta}}.$$

$$Q_s = Q_n + Q_B, \text{ де } Q_B = -qN_A W_m = -\sqrt{2qN_A \varepsilon_s (V_D + 2\psi_B)}$$

і Q_n заряд обумовлений неосновними носіями в інверсійному шарі:

$$|Q_n| \equiv q \int_0^{x_i} n(x) dx = q \int_{\psi_s}^{\psi_B} \frac{n(\psi) d\psi}{d\psi / dx}, \quad |Q_n| = q \int_{\psi_s}^{\psi_B} \frac{n_{p0} e^{(\beta\psi - \beta V_D)} d\psi}{(\sqrt{2kT / qL_D}) F(\beta\psi, V_D, n_{p0} / p_{p0})}.$$

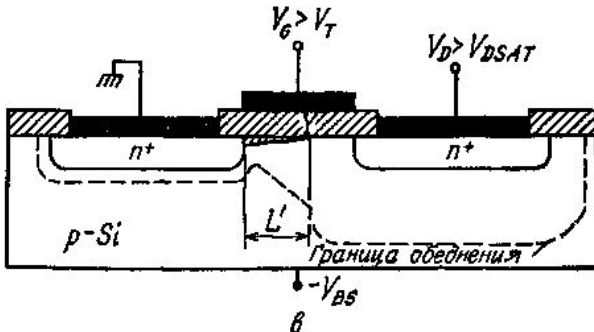
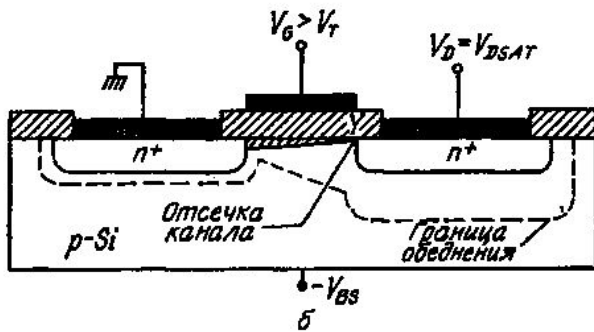
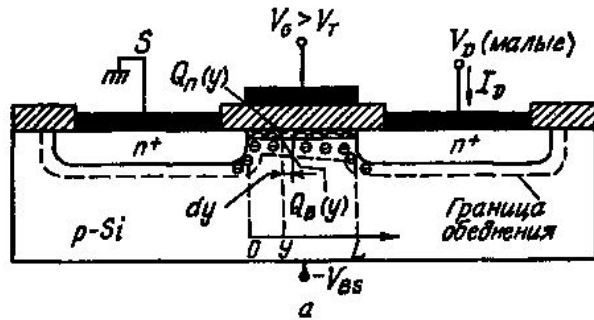
Розраховується чисельними методами.

Більш простий і зручний вираз для Q_n , який справедливий при досить сильній інверсії, дає так звана модель заряджених шарів:

$$|Q_n| = \sqrt{2}qN_A L_D \{ [\beta\psi_s + (\frac{n_{p0}}{p_{p0}}) e^{(\beta\psi_s - \beta V_D)}]^{1/2} - (\beta\psi_s)^{1/2} \}.$$

Вирази для Q_n наведені для випадку, коли обернене зміщення на підкладці відсутнє ($V_{BS}=0$). При наявності такого зміщення при розрахунку Q_n потрібно підставити $\beta(V_D + V_{BS})$ замість βV_D .

Лінійна область та область насичення I-V характеристики



Вважаємо, що напруга на затворі структури G достатня для сильної інверсії на границі з окислом. Тоді, якщо напруга на стоці V_D не дуже велика, інверсійний шар діє як звичайний опір, і струм через провідний інверсійний канал I_D буде збільшуватись пропорційно напрузі стоку V_D . Ця область називається **лінійною областю роботи приладу**. Зі збільшенням напруги на стоці в решті решт досягається момент, коли ширина каналу x_i , а відповідно, і заряд інверсійного шару Q_n в точці $y=L$ (прямо на границі стоку) стає рівним нулю.

МОН транзистор в лінійному режимі (малі напруги на стоці) (а), на початку насичення (відсічка каналу на границі зі стоком $Y=L$) (б) і в режимі насичення (показано зменшення ефективної довжини каналу) (в).

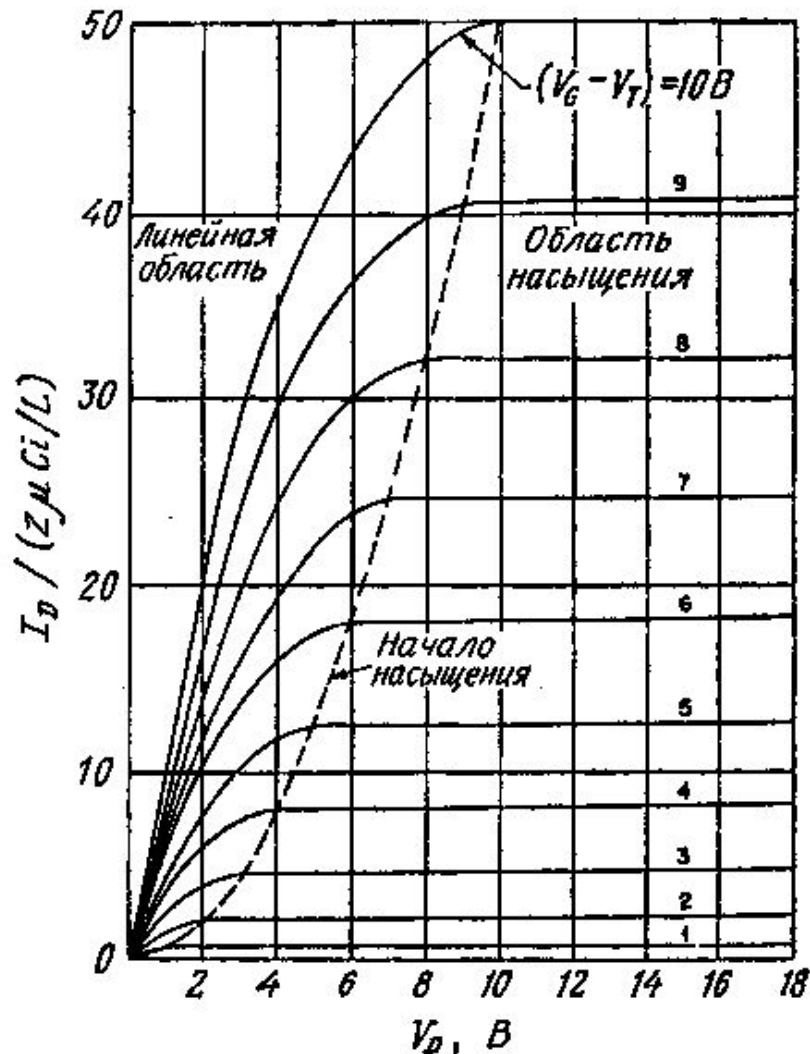
Ці умови відповідають початку **режиму відсічки каналу** (Рис.б). Напругу стока в даному режимі позначимо V_{Dsat} . При більших напругах ($V_D > V_{Dsat}$) точка відсічки Y зсувається до витоку, а струм стоку при цьому збільшується лише незначно. (Рис. в), оскільки напруга між витоком і точкою відсічки каналу Y як і раніше рівна V_{Dsat} .

Інжекція неосновних носіїв з точки в збіднену область стока подібна процесу інжекції носіїв переходом емітер-база біполярного транзистора в збіднену область його колекторного переходу.

Для отримання аналітичних співвідношень, що визначають основні характеристики МОН транзисторів використовуються **наступні припущення**:

1. Підзатворна область приладу являє собою ідеальну МОН структуру;
2. Враховується лише дрейфова компонента струму;
3. Рухливість носіїв в інверсійному шарі постійна (не залежить від електричного поля);
4. Концентрація легуючої домішки в каналі однорідна;
5. Зворотні струми витоку р-п переходів знехтувано малі;
6. Поперечне електричне поле E_x , направлене перпендикулярно до границі розділу (по осі x), значно перевищує поздовжнє електричне поле E_y , направлене вздовж поверхні (по осі y). Останнє припущення називається **наближенням плавного каналу**.

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_i \left\{ (V_G - 2\psi_B - \frac{V_D}{2}) V_D - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A}}{C_i} \{ (V_D + 2\psi_B)^{3/2} - (2\psi_B)^{3/2} \} \right\}.$$



При фіксованій напрузі на затворі V_G струм стоку I_D спочатку лінійно збільшується з напругою стоку V_D (**лінійна область**), потім крутизна характеристики плавно зменшується до нуля, після чого починається **область насичення**.

Вихідні (стокові) характеристики ідеального МОН транзистора (I_D в залежності від V_D). Штрихова лінія з'єднує точки початку насичення на характеристиках, що відповідають різним зміщенням на затворі транзистора ($J_{D sat}$, $V_{D sat}$). При $V_D > V_{D sat}$ струм стоку залишається постійним.

Лінійна область характеристик

Для малих напруг стоку, розклавши в ряд вираз для I_D отримаємо

$$I_D \approx \frac{Z}{L} \mu_n C_i [(V_G - V_T)V_D - (\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{\epsilon_s q N_A / \psi_B}}{4C_i})V_D^2],$$

Подальше спрощення (при $V_D \ll (V_G - V_T)$)

$$I_D \approx \frac{Z}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T)V_D, \quad V_T = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_i} \quad \text{-порогова напруга.}$$

Експериментально порогову напругу визначають шляхом лінійного продовження сток-затворної характеристики ($I_D - V_G$), яка міряється при малих V_D , до перетину з віссю напруг.

Диференціювання виразу для I_D дає значення провідності g_D і крутизни g_m ідеального МОН транзистора в лінійній області

$$g_D \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_G = \text{const}} = \frac{Z}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T), \quad g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{const}} = \frac{Z}{L} \mu_n C_i V_D.$$

Область насичення характеристик

При збільшенні напруги стоку заряд інверсійного шару Q_n в точці $y=L$ (біля краю стока) зменшується і, нарешті, стає рівним нулю при $V_D = V_{Dsat}$. Це явище називається **відсічкою каналу**. При $V_D = V_{Dsat}$ струм стока досягає максимального значення I_{Dsat} . При більших напругах ($V_D > V_{Dsat}$) настає насичення ($I_D = I_{Dsat}$).

$$I_{Dsat} \approx \frac{mZ}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T)^2,$$

де коефіцієнт m в загальному випадку залежить від рівня легування підкладки. При відносно малих концентраціях домішки $m=1/2$.

Крутизна МОН транзистора в області насичення має вид

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D=const} = \frac{2mZ}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T).$$

Проаналізуємо вплив на характеристики МОН транзистора
-неідеальності МОН структури та;
-дифузійної компоненти струму в каналі.

1. Вплив неідеальності МОН структури

Фіксований заряд окисла і різниця робіт виходу електрона з металу і напівпровідника обумовлюють зсув напруги плоских зон МОН-структури V_{FB} .

На цю ж величину повинна зсуватись і порогова напруга МОН транзистора:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_i} = (\varphi_{ms} - \frac{Q_f}{C_i}) + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_i}.$$

На порогову напругу МОН-транзистора впливає також напруга оберненого зміщення підкладки V_{BS} :

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B + V_{BS})} / C_i.$$

$$\Delta V_T = V_T(V_{BS}) - V_T(V_{BS} = 0) = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_i} (\sqrt{2\psi_B + V_{BS}} - \sqrt{2\psi_B}).$$

2. Вплив дифузійної компоненти струму каналу

При аналізі необхідно розглядати повний струм, який включає обидві компоненти (дрейфову і дифузійну):

$$J_D(x, y) = q\mu_n n E_y + qD_n \nabla n = qD_n n(x, y) \nabla \psi_{Fn}.$$

Підпорогова область

Якщо напруга на затворі МОН-транзистора нижча порогової і границя з окислом знаходиться в умовах слабкої інверсії, відповідний струм стоку називається **підпороговим струмом**. Підпорогова область характеристик особливо важлива для МОН транзисторів для низьковольтних напівпровідникових пристроїв з малим енергоспоживанням (цифрові логічні схеми, пристрої пам'яті), оскільки саме цей режим відповідає закритому стану МОН-транзистора, а також описує процес переключення з закритого стану у відкритий.

В умовах слабкої інверсії основною компонентою струму каналу є дифузійна складова.

$$I_D = -qAD_n \frac{dn}{dy} = qAD_n \frac{n(0) - n(L)}{L},$$

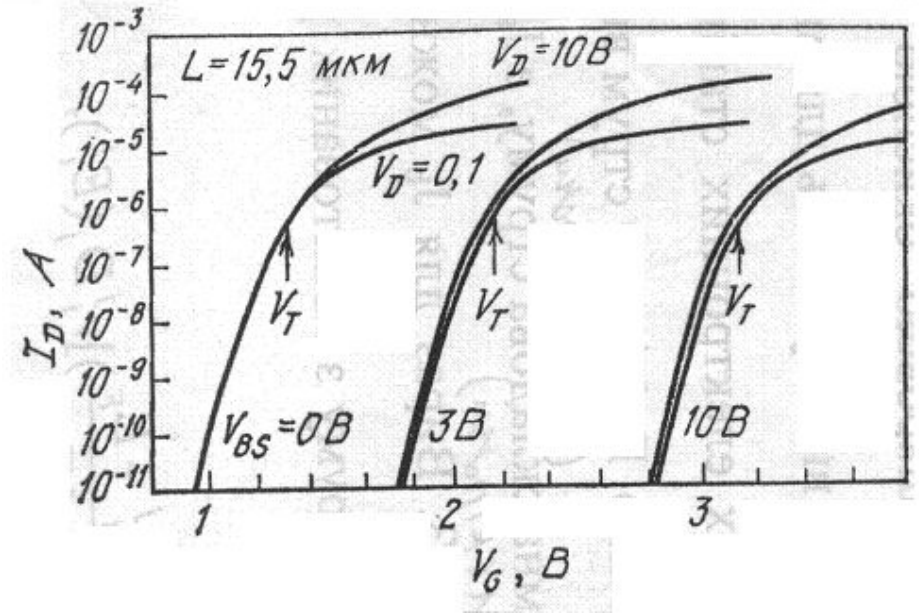
де A – ефективна поперечна площа каналу, а $n(0)$ і $n(L)$ –об'ємні концентрації електронів біля витоку і стоку відповідно:

$$n(0) = n_{p0} \exp(\beta\psi_s),$$

$$n(L) = n_{p0} \exp(\beta\psi_s - \beta V_D).$$

тут ψ_s поверхневий потенціал біля витоку.

Нижче порогової напруги струм стоку МОН-транзистора експоненційно залежить від напруги на затворі. Підпороговий струм експериментальних кривих практично не змінюється при зміні напруги стока від 0,1 до 1 В. Незалежність I_D від V_D на підпороговій ділянці характерна для довгоканального МОН-транзистора.



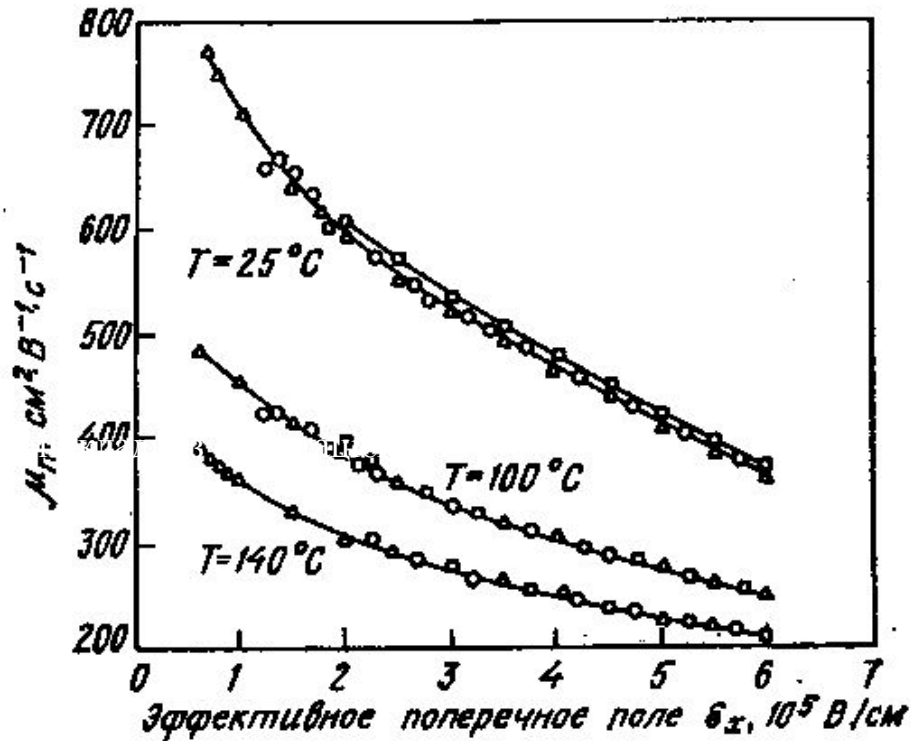
Експериментальні підпорогові характеристики МОН-транзистора з довгим каналом ($L=15,5 \text{ мкм}$). Товщина шару окисла і рівень легування підкладки приладу 57 нм і $5,6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Рухливість носіїв

При малих повздовжніх електричних полях E_y дрейфова швидкість носіїв інверсійного шару пропорційна прикладеному полю

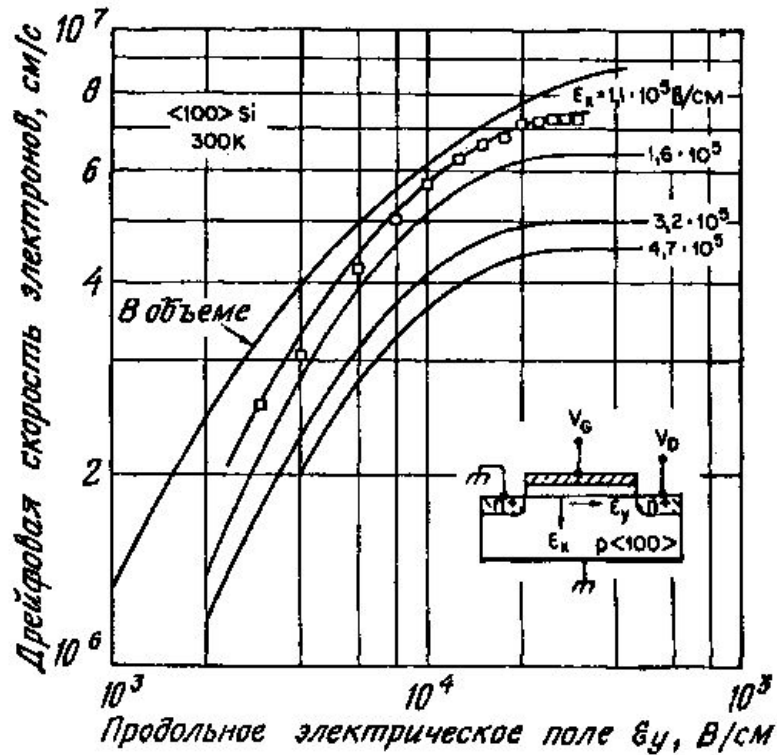
$$v_d = \mu_n E_y$$

(E_y - паралельне напрямку струму). Дрейфова поверхнева рухливість μ_n залежить від поперечного електричного поля E_x (E_x перпендикулярне напрямку струму).



Залежність рухливості носіїв інверсійного шару μ_n від ефективного поперечного поля E_x при трьох температурах ($E_y < 10^3 \text{V/cm}$).

Кремнієвий МОН транзистор на p підкладці з орієнтацією $\langle 100 \rangle$.



Залежність дрейфової швидкості електронів від повздовжнього поля при деяких значеннях поперечного поля.

При збільшенні повздовжнього електричного поля E_y , настає насичення дрейфової швидкості (аналогічно тому, що спостерігається в об'ємі кремнію).

Ефект насичення дрейфової швидкості приводить, **по-перше**, до суттєвого зменшення струму насичення МОН-транзистора, і, **по-друге**, до того, що струм насичення приблизно пропорційний напрузі на затворі, а не квадратичний, як показує теорія ідеального МОН-транзистора.

В умовах насичення дрейфової швидкості струм насичення МОН-транзистора

$$I_{Dsat} = ZC_i (V_G - V_T) v_s$$

і, відповідно, його крутизна в цьому режимі постійна:

$$g_m = (\partial I_{Dsat}) / \partial V_G = ZC_i v_s.$$

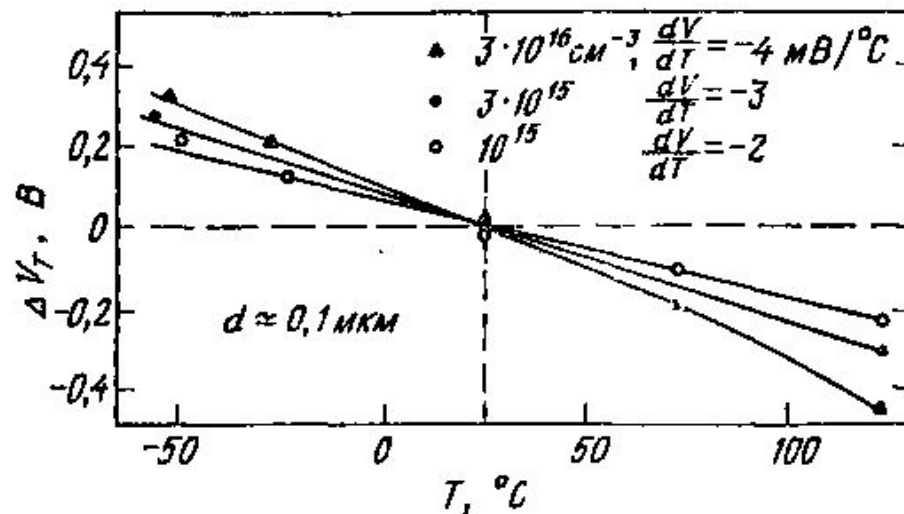
Температурна залежність

Температура впливає на багато параметрів і характеристики МОН-транзисторів, особливо на (i) рухливість, (ii) порогову напругу і (iii) форму підпорогової ділянки характеристик. При напрузі на затворі, що забезпечує сильну інверсію, рухливість інверсійних носіїв при $T > 300\text{K}$ зменшується з температурою за законом T^{-2} .

Температурна залежність порогової напруги в лінійній області роботи МОН-транзистора

$$V_T = \varphi_{ms} - \frac{Q_f}{C_i} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_i}.$$

Оскільки різниця робіт виходу і фіксований заряд окислу не залежать від температури, диференціюючи вираз для V_T по температурі, отримаємо



Залежність порогової напруги від температури.

$$\frac{dV_T}{dT} = \frac{d\psi_B}{dT} \left(2 + \frac{1}{C_i} \sqrt{\frac{\varepsilon_s q N_A}{\psi_B}} \right), \quad \text{де}$$

$$\frac{d\psi_B}{dT} \approx \pm \frac{1}{T} \left[\frac{E_g(T=0)}{2q} - |\psi_B(T)| \right].$$

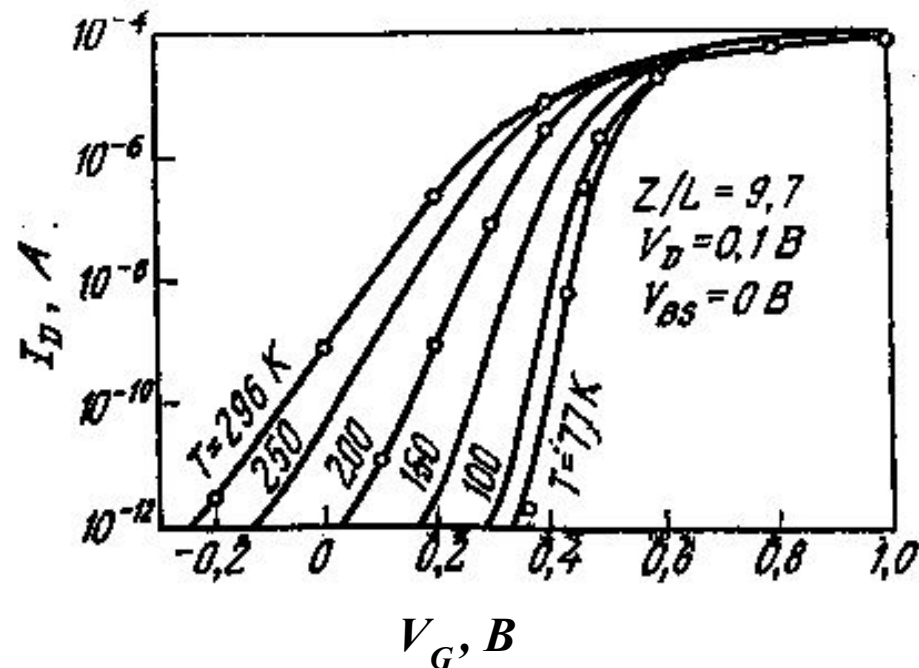
При заданій товщині шару окисла величина похідної dV_T/dT в основному збільшується з ростом рівня легування.

Зі зниженням температури характеристики МОН-транзистора покращуються (особливо в підпороговій області).

При зменшенні температури від 296 до 77 К порогова напруга зросла від $V_T=0,25$ до 0,5 В. Однак найбільш важливим покращенням є значне зменшення характерного перепаду затворної напруги S , яка необхідна для зміни підпорогового струму на порядок (від 80 мВ на декаду при 296 К до 22 мВ на декаду при 77 К).

Іншими перевагами роботи МОН-транзистора при 77 К є підвищена рухливість, більш високі крутизна і провідність в околиці порога, знижене розсіяння потужності, менші струми витоку p - n переходів і менший опір металічних шин.

Основним недоліком при цьому є необхідність розміщення приладів в спеціальному інертному охолоджуючому середовищі (наприклад, у рідкому азоті) і пов'язані з цим додаткові, чисто технічні труднощі.

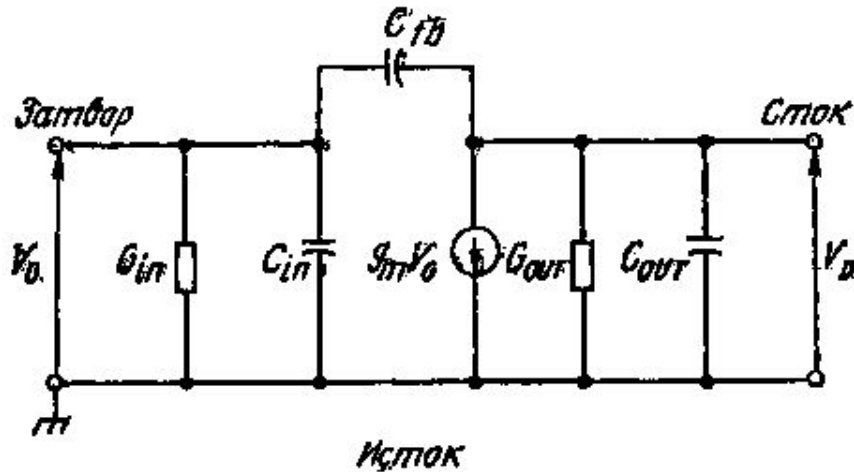


Передаточна характеристика довгоканального приладу ($L=9$ мкм) при різних температурах.

Типи МОН-транзисторів

Ідеальний МОН-транзистор являє собою підсилювач з нескінченим входним опором і генератором струму на виході.

Електричні властивості реальних приладів надаються більш складною еквівалентною схемою.



Еквівалентна електрична схема МОН-транзистора для включення зі спільним витоком.

g_m - диференційна крутизна;

G_{in} - входна провідність, яка визначається струмом витоку через тонкий шар підзатворного діелектрика. Для термічно вирощених шарів двоокису кремнію струм витоку між затвором і каналом дуже малий (його густина складає 10^{-10} А/см²). І зазвичай входною провідністю нехтують.

C_{in} - входна ємність рівна dQ_m/dV_G , де Q_m - повний заряд на затворі.

C_{fb} - прохідна ємність. В реальних приладах тонкий шар окислу і затвор частково перекривають області стоку і витоку. Цей крайовий ефект дає основний вклад в прохідну ємність.

G_{out} - вихідна провідність рівна провідності стокового р-п переходу.

C_{out} - вихідна ємність представляє головним чином ємності р-п переходів стоку і витоку, які послідовно з'єднані через об'єм напівпровідникової підкладки.

В лінійному режимі роботи МОН-транзистора максимальна робоча частота приладу

$$f_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{g_m}{2\pi C_{in}} \approx \frac{\mu_n V_D}{2\pi L^2}.$$

В області насичення

$$f_m \approx \frac{v_s}{L},$$

$$\tau = \frac{L}{v_s}.$$

що відповідає часу прольоту каналу зі швидкістю насичення

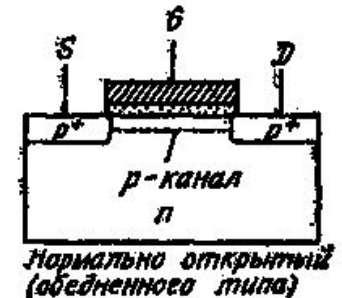
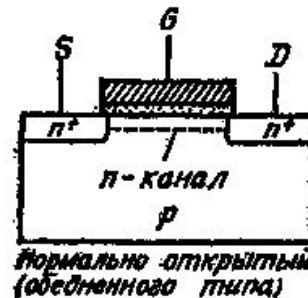
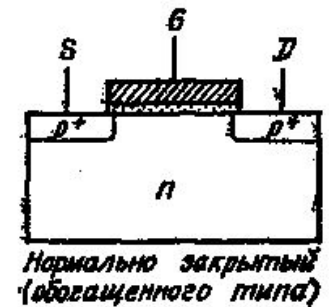
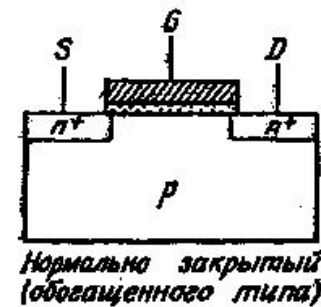
Для $L=1$ мкм і $v_s=10^7$ см/с час прольоту τ складає лише 10 пс.

В залежності від типу інверсійного каналу розрізняють чотири основних типи МОН-транзисторів.

Якщо при нульовій напрузі на затворі провідність каналу дуже мала і для утворення інверсійного n -канала до затвора потрібно прикласти додатну напругу, такий прилад називається нормально закритим n -канальним МОН транзистором. Якщо ж n -канал існує вже при нульовому зміщенні на затворі і, щоб зменшити його провідність, до затвору слід прикласти від'ємну збіднюючу напругу, такий прилад називають нормально відкритим n -канальним МОН транзистором. Аналогічним чином класифікуються p -канальні МОН транзистори: нормально закриті і нормально відкриті.

Відмітимо, що для нормально закритого n -канального приладу, щоб отримати помітний струм стоку, необхідно прикласти до затвору велике додатне зміщення, що перевищує порогову напругу V_T . В нормально відкритих приладах значні струми можуть протікати вже при $V_G=0$, а зміщення затвора збільшує або зменшує їх величину. Сказане вище можна легко розповсюдити і на p -канальні прилади, відповідним чином змінивши полярність напруги.

Основні типи МОН-транзисторів. а- n -канальні; б- p -канальні.



а

б

Тип	Электрический символ	Выходные характеристики	Передаточные характеристики
п-канал Нормально закрытый (обогащенного типа)			
п-канал Нормально открытый (обедненного типа)			
р-канал Нормально закрытый (обогащенного типа)			
р-канал Нормально открытый (обедненного типа)			

Електричні символи, передаточні та вихідні характеристики чотирьох типів МОН-транзисторів.

Короткоканальні ефекти

В міру зменшення довжини каналу МОН-транзистора властивості останнього починають різко відрізнятися від властивостей звичайних довгоканальних приладів.

Ці відхилення – так звані **короткоканальні ефекти**- обумовлені суттєво двомірним характером розподілу електричних полів в активній області і порівняно високими абсолютними значеннями напруженості полів.

1. Розподіл потенціалу в короткоканальному приладі має двомірний характер, і для його опису вже не можна використовувати **наближення плавного каналу**, яке допускає, що $E_x \gg E_y$. Двомірний характер розподілу потенціала суттєво змінює підпорогову ділянку характеристики приладу, і обумовлює небажану залежність порогової напруги від довжини каналу і напруг зміщень на електродах, зменшує вихідний опір, перешкоджає відсічці каналу.

2. При підвищених значеннях електричних полів, характерних для короткоканальних приладів, стає важливою польова залежність рухливості, яка в кінцевому результаті приводить до насичення дрейфової швидкості.

3. При ще більших полях в околиці стокового переходу починається ударна іонізація, стає суттєвою додаткова провідність по підкладці і відбувається так зване включення паразитного біполярного транзистора.

4. Високі електричні поля приводять також до розігріву носіїв і відповідної інжекції гарячих носіїв в окисел. Така зарядка окисла обумовлює зсув порогу, дрейф характеристик і погіршення крутизни приладу.

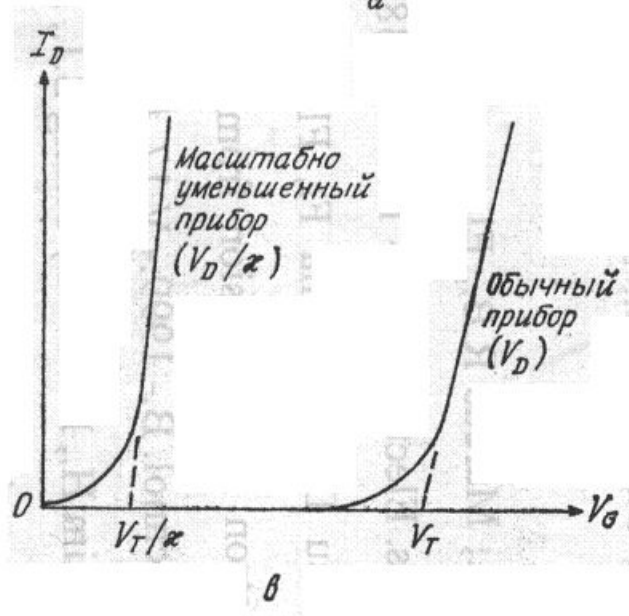
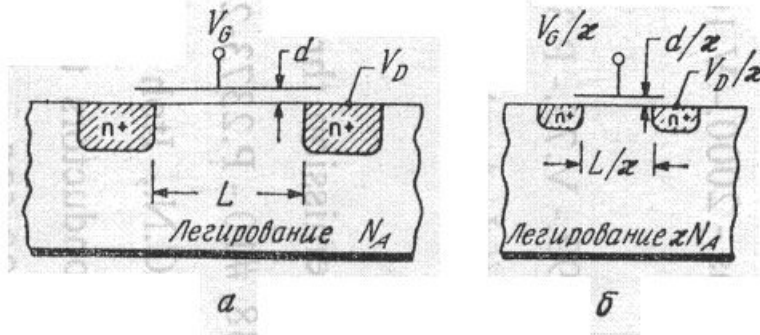
Всі перераховані короткоканальні ефекти ускладнюють роботу приладу і погіршують його робочі характеристики. Отже, при конструюванні слід прагнути до усунення або мінімізації цих ефектів, щоб «фізично» коротко канальний прилад був «електрично» подібним до довго канального.

Довгоканальний МОН транзистор – довжина каналу L значно перевищує суму товщин збіднених шарів стоку і витоку ($L \gg W_S + W_D$).

Короткоканальний МОН транзистор – довжина каналу L рівна або менша суми товщин збіднених шарів стоку і витоку ($L \leq W_S + W_D$).

МОН-транзисторні структури

Масштабне зменшення розмірів



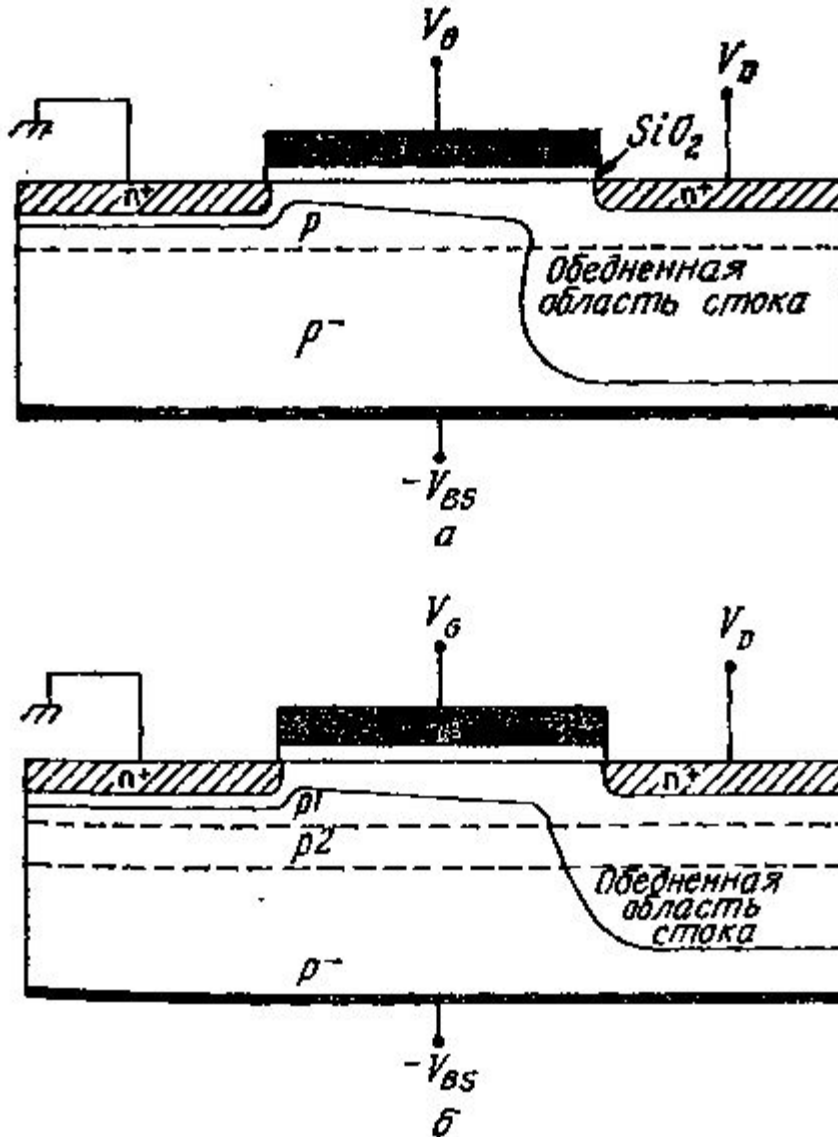
Одним із способів усунення коротко канальних ефектів є пропорційне зменшення всіх характерних розмірів приладу. При цьому слід в стільки ж раз зменшити і характерні значення робочих напруг, з тим щоб зовнішні електричні поля в приладі залишались на попередньому рівні. Таке масштабне зменшення розмірів являє собою найпростіший підхід до проблеми мініатюризації МОН транзисторів.

Пропорційне зменшення розмірів як принцип мініатюаризації. а- довгоканальний прилад; б- прилад з пропорційно зменшеними розмірами; в- стоківі характеристики.

Рівень легування підкладки в масштабованому приладі в κ раз (κ - масштабний фактор) більший, ніж в звичайному приладі, і оскільки напруга живлення також зменшена в κ раз, товщина відповідних збіднених областей виявляється в κ раз меншою.

Звернемо увагу та те, що область підпорогових струмів на характеристиках обох приладів (Рис.) практично однакова. Це недивно, оскільки при такому масштабному перетворенні характерна напруга $S \sim (1 + C_D/C_i)$ залишається незмінною (ємності C_D і C_i збільшились в κ раз). Відмітимо також, що контактна різниця переходів V_{ib} і характерний поверхневий потенціал ψ_s не зменшуються при такому «масштабуванні», а навіть збільшуються (на $\sim 10\%$ при збільшенні рівня легування в 10 раз). Тому не змінюється і характерна різниця затворних напруг (~ 0.5 В), що відповідають початку сильної інверсії і режиму збіднення. Паразитні ємності при такому масштабному зменшенні розмірів можуть і не зменшитись. Опір шин розводки зазвичай збільшується зі зменшенням розмірів.

Високоякісні МОН-структури (НМОS)



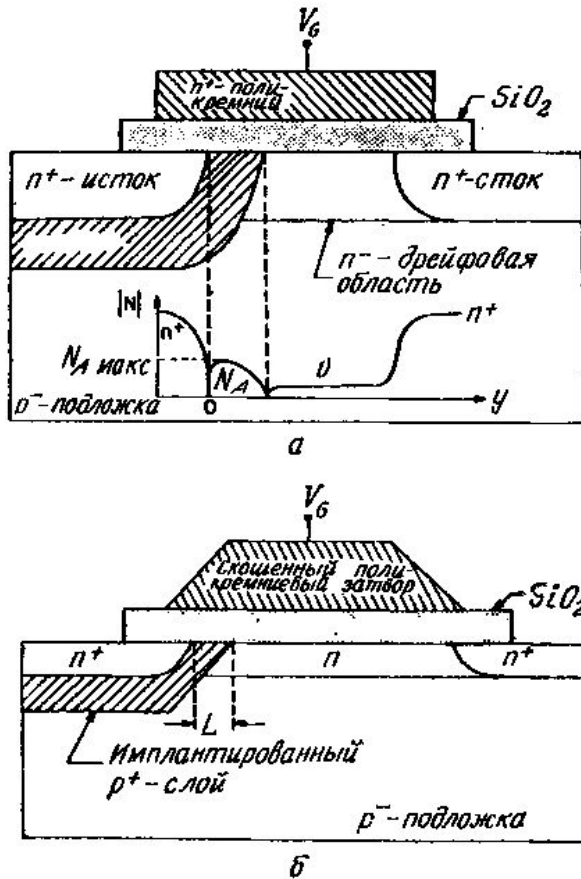
Високоякісні МОН структури- це транзистори виготовлені з використанням іонної імплантації. Структура на Рис.а, містить один імплантований шар. Він контролює порогову напругу МОН-транзистора і в певній мірі перешкоджає змиканню збіднених областей стоку і витоку. Відмітимо, що імплантований шар тут дуже вузький, і збіднена область стоку виходить за його межі в низьколеговану підкладку. Це забезпечує досить малу вихідну ємність МОН-транзистора (ємність переходу сток-підкладка)

Високоякісні МОН-структури (НМОS). а- з одним імплантованим шаром; б- двократно імплантована структура.

На Рис. 6 показана така структура з подвійною іонною імплантацією. Параметри першого імплантованого шару $p1$ вибираються для забезпечення необхідної порогової напруги МОН-транзистора, а характеристики другого шару $p2$ - для запобігання змикання. Використання подвійної іонної імплантації дає змогу суттєво мінімізувати короткоканальні ефекти в таких МОН-структурах з фізично малими довжинами каналів.

Імплантація однак погіршує підпорогову ділянку характеристик (збільшує значення характерної напруги S) і підвищує чутливість порогу до зміщення підкладки V_{BS} . Ці небажані ефекти необхідно враховувати при оптимізації параметрів структури.

МОН-структури з подвійною дифузією (DMOS)



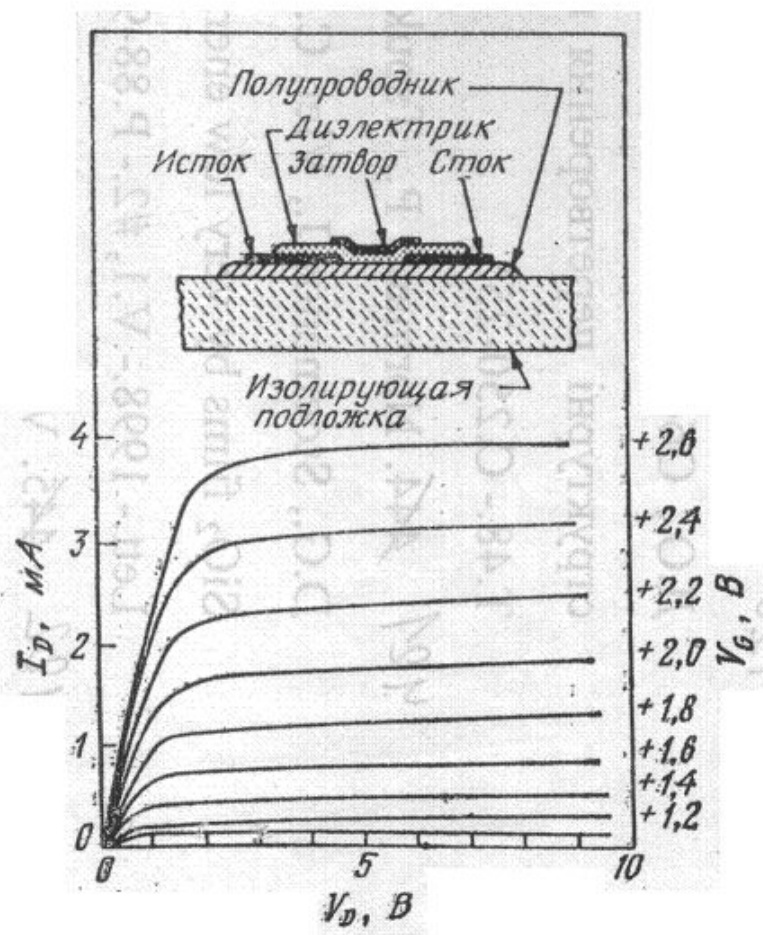
МОН-структури з подвійною дифузією (а) і дворазовою іонною імплантацією (б).

МОН структура з використанням так званої подвійної дифузії (Рис.). Цей процес, який широко використовується в біполярній технології, заснований на тому, що швидкість дифузії p - домішки (наприклад бору) в кремнії вища, ніж n – домішки (наприклад, фосфору). В даному випадку він дає можливість отримувати структури з порівняно короткими каналами. На Рис.а також показаний профіль легування такої структури вздовж границі з окислом. Відмітимо, що зразу за каналом слідує низьколегована дрейфова область. В аналогічній структурі, виготовленій з використанням двократної іонної імплантації (Рис.б), в якості маски використовується полікремнієвий затвор, скошені краї якого забезпечують вихід імплантованої p – області на границю з окислом.

Такі структури можуть мати **дуже короткі канали**, і при їх виготовленні використовується звичайний фотолітографічний процес. Обидві структури (Рис.) **дуже стійкі по відношенню до змикання** через високу концентрацію домішки в p – шарі. Порівняно протяжна низьколегована дрейфова область служить як би загрузкою, **стабілізуючи електричне поле** в каналі на рівні $\geq 10^4$ В см⁻¹, достатньому для досягнення носіями швидкості насичення. Таке обмеження максимальних електричних полів в структурі перешкоджає розвитку небажаних процесів лавинного помноження носіїв і зарядки окисла. В цьому відношенні структури з подвійною дифузією мають значні переваги перед МОН транзисторами, виготовлені за стандартною і НМОН технологією.

Однак в цих структурах важче контролювати порогову напругу МОН транзистора, яка визначається максимальним значенням концентрації N_{Amax} на границі з окислом. Крім того, порівняно висока концентрація домішки у вузькому p - шарі, необхідна для запобігання змикання стоку з витоком, погіршує підпорогову ділянку характеристик, що відповідає закритому стану МОН транзисторів.

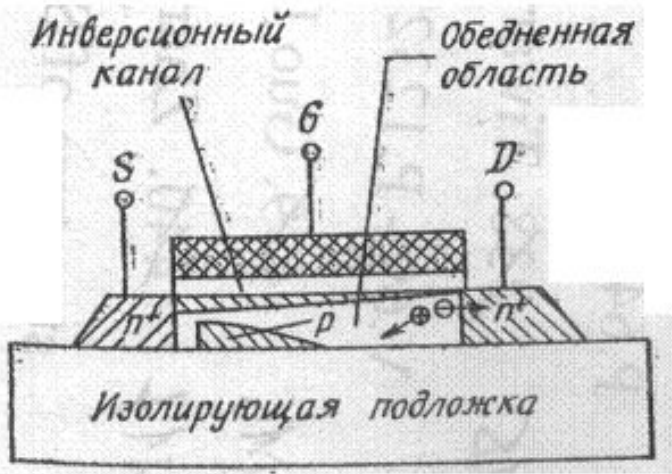
Тонкоплівковий транзистор



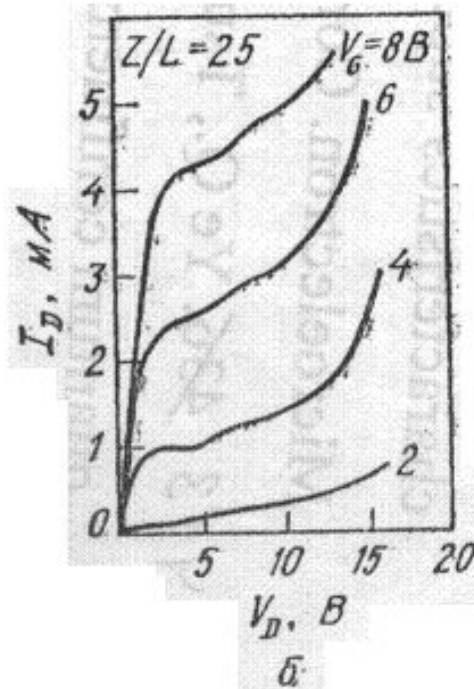
Тонкоплівковий транзистор і його стокові характеристики.

Тонкоплівковий транзистор (ТПТ) має структуру, що складається з послідовно нанесених на ізолюючу підкладку шарів напівпровідника (наприклад CdS), діелектрика і металу. Вольт-амперні характеристики ТПТ транзистора збагаченого типу подібні відповідним характеристикам звичайних МОН-транзисторів. Оскільки напівпровідникова плівка в ТПТ звичайно наноситься простим розпиленням, в ній міститься значно більша кількість дефектів і порушень кристалічної ґратки, ніж у відповідних монокристалічних зразках. Тому транспортні процеси в таких плівках більш складні, ніж в монокристалах. Для покращення приладних характеристик ТПТ, надійності і відтворюваності слід знижувати густину об'ємних і поверхневих пасток в напівпровідниковій плівці.

Структури типу “кремній на ізоляторі” (КНІ)



a.

 δ

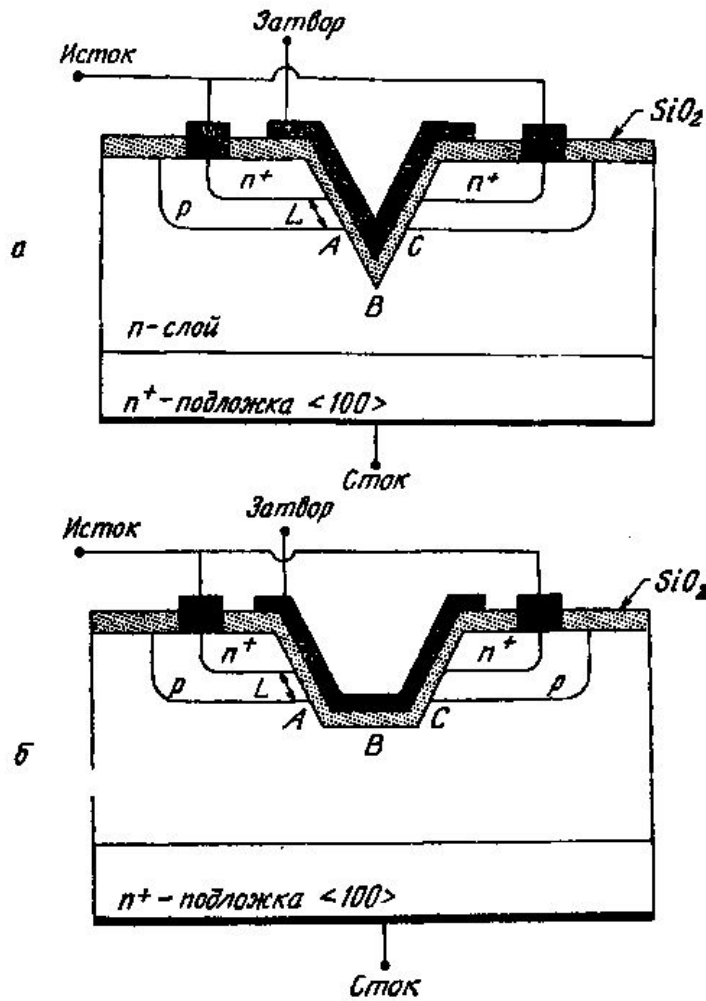
МОН-транзистор типу
«кремній на ізоляторі» (а)
і стокові характеристики
КНС приладу (б).

До даного часу запропоновано досить велику кількість структур типу «кремній на ізоляторі» (КНІ): кремній на сапфірі (КНС), кремній на шпінелі, кремній на нітриді і кремній на окислі. КНІ прилади формуються по стандартній МОН технології на монокристалічній кремнієвій плівці, яка епітаксійно вирощена на ізолюючій підкладці (наприклад, на Al_2O_3 у випадку КНС).

Діелектрична підкладка забезпечує діелектричну ізоляцію сусідніх приладів. Типові характеристики n – канального КНС приладу показані на Рис.6. Перегини в області насичення характеристик можна пояснити наступним чином. Коли напруга стоку збільшується, в області поблизу стокового контакту починається слабкий процес лавинного помноження. Генеровані при цьому електрони зразу ж поступають на сток, а генеровані дірки рухаються до витоку, складаючи струм підкладки. Однак, оскільки КНС прилад не має контакту до підкладки, ці дірки накопляються біля границі витоку, зміщуючи його в прямому напрямі. При цьому прилад фактично якби знаходиться в режимі з додатньо зміщеною підкладкою $V_{BS} > 0$, що еквівалентно зменшенню порогової напруги. Цим пояснюються скачки струму, що спостерігаються. Амплітуда сачків порогової напруги сильно залежить від ступеню легування підкладки: чим більша концентрація, тим більший скачок V_T і тим помітніші перегини вольт-амперних характеристик.

Для виготовлення КНІ приладів запропоновано також використовувати рекристалізацію лазерним відпалом плівок аморфного кремнію на ізолюючих підкладках, таких як Si_3N_4 і SiO_2 . В даний час робочі характеристики КНІ структур значно поступаються відповідним характеристикам приладів на монокристалічних підкладках. Це обумовлено високою густиною дефектів в об'ємі таких епітаксійних кремнієвих плівок і великою густиною поверхневих станів на границях розділу кремній-ізолятор. З покращенням якості плівок КНІ-прилади знаходять все більш широке застосування в **НВЧ** схемах. Крім того на основі КНІ структур можна пробувати створити **трьохмірний рівень інтеграції мікросхем**, «накладаючи» одна на одну відповідні плоскі базові КНІ-структури.

МОН-транзистор з V-канавкою



МОН транзистори з V- канавкою і U- канавкою виготовляються на кремнієвих підкладках з орієнтацією $\langle 100 \rangle$ на основі ефекту анізотропного травлення. Витравлені канавки мають характерний кут нахилу на 54.7° по відношенню до горизонтальної площини. Розподіл легуючих домішок тут аналогічний розподілу домішок в МОН транзисторах з подвійною дифузією. В цих приладах два паралельних один одному канали довжиною L розміщені на обох боках витравленої канавки. Спільним стоком служить підкладка. В такій конфігурації легко з'єднати паралельно необхідну кількість окремих приладів, що дає змогу створювати таким способом потужні перемикачі, що витримують великі струми.

МОН-транзистор з V- подібною канавкою (а) і U- подібною канавкою (б).

В тих ситуаціях, коли вимагається планарна організація схеми, тобто потрібно, щоб всі контакти виходили на зовнішню поверхню кристала, можна виключити зі структури n^+ – область і збільшити ступінь легування p – шару (замінити p на p^+). Ліва p^+ – область тоді буде стоком, права – виток (або навпаки), а власне канал буде розміщений на границі АВС.

Дякую за увагу!