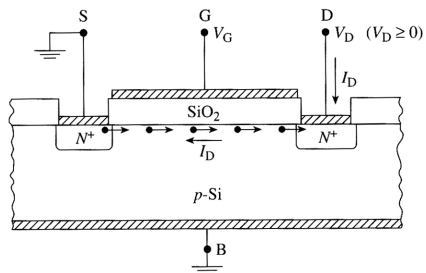


## MOS diod

Metall-oksiid- pooljuht (MOS) on kaasaja mikroelektronikas kõige rohkem kasutatav siire üldse!

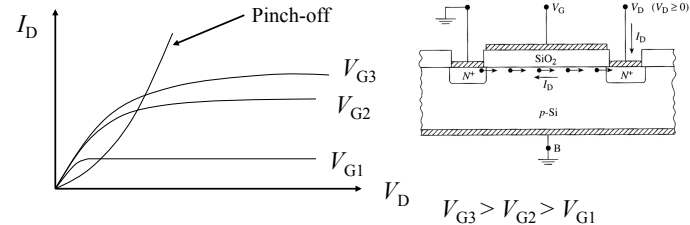


n-kanaliga  
MOSFET  
(NMOS)  
kasutab p-tüüpi alust

S- allikas (source), G- pais (gate), D- neel (drain)

1

## MOSFET tööpõhimõte



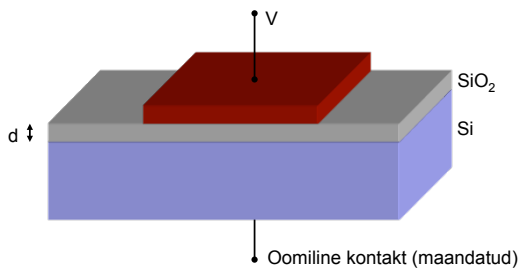
Kui paisule (gate) rakendada positiivne pinge (aluse suhtes)  $V_G$ , siis elektrone tõmmatakse  $\text{SiO}_2$  poole ning nad moodustavad omapärase kanali.

Iga  $V_G$  jaoks vool  $I_D$  kasvab  $V_D$  kasvades ning lõpuks jõuab küllastusse.

2

## MOS diod

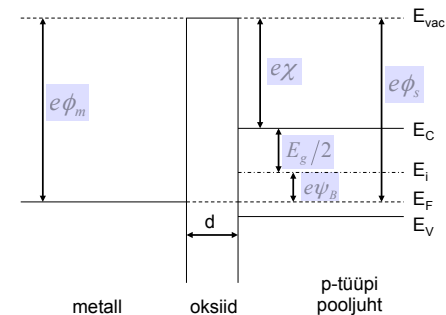
Tüüpiline metall-oksiid-pooljuht (MOS) diod omab sellist struktuuri



V on metallile rakendatud pinge.

3

## Tsoonipilt



Termilises tasakaalus (ilma välise pingeta) on metalli ning pooljuhi fermi nivood ühel joonel.

4

## Ideaalne MOS diood

Ideaalne MOS diood vastab järgnevale tingimustele:

1) Välise pinge puudumisel on metalli ja pooljuhi väljumistööde vahe 0 (flat band condition)

$$e\phi_{ms} = e\phi_m - e\phi_s = e\phi_m - \left( e\chi + \frac{E_g}{2} + e\psi_B \right) = 0$$

2) Ainsad laengud, mis diodis eksisteerivad, asuvad pooljuhis ja metalli pinnal ja on muidugi vastasmärgilised.

3) Laengukandjad ei läbi oksiidikihti!

Siin vaatleme p-tüüpi MOS diodi.

5

## MOS diood välise pingega akumulatsioon

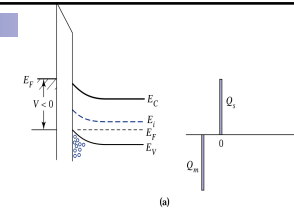
Negatiivne pinge ( $V < 0$ )

Vool puudub. Pooljuhi Fermi tase on muutumatu. Tsoonid ääred kaarduvad üles. Pooljuhi-oksiidi pinnale kogunevad augud.

$$p_p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

Kuna vahe  $E_i - E_F$  suureneb pooljuhi pinnal, siis piirpinnale **akumuleeritakse** auke.

$$|Q_m| = Q_s$$



## MOS diood välise pingega tühjenemine

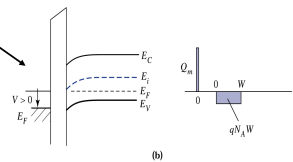
Väike positiivne pinge ( $V > 0$ )

Väikese positiivse pingega korral kaarduvad tsoonid allapoole ning siirdeala tühjeneb põhilistest laengukandjatest.

$$p_p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

Laeng avaldub siis

$$Q_{sc} = -eN_A W$$



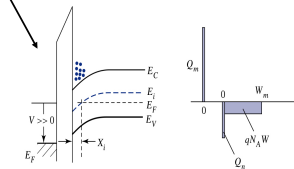
## MOS diood välise pingega inversioon

Suur positiivne pinge ( $V \gg 0$ )

Tsoonid kaarduvad alla nii, et  $E_i$  ja  $E_F$  tasemed lõikuvad.

$$n_p = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

Toimub inversioon, kus mittepõhiliste laengukandjate (elektronide) kontsentratsioon ületab põhiliste (aukude) oma piirpinnal.



## MOS diood välise pingega

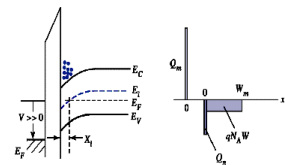
tugev inversioon

Nõrk inversioon algab kui  $(E_F - E_i) > 0$  ja mittepõhiliste laengukandjate kontsentratsioon kasvab eksponentsiaalselt.

Tugev inversioon on siis, kui mittepõhiliste laengukandjate kontsentratsioon on ligikaudselt võrdne aluse legeerimise tasemega.

Sellest punktist kaugemal on suurem osa lisandunud negatiivsest laengust võrdne laenguga  $Q_n$  väga kitsas  $n$ -tüüpi inversioonikihis paksusega  $x_i$  oksiidi-pooljuhi piirpinnal ( $x_i \sim 1-10 \text{ nm} \ll W$ ).

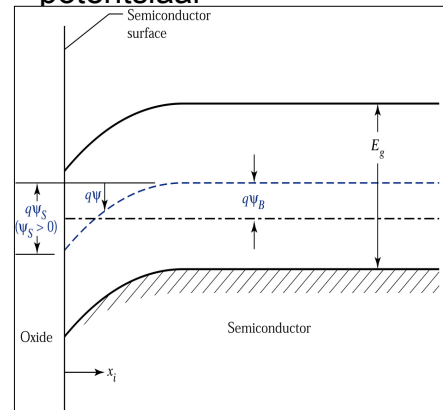
Siirdeala paksus on siis maksimaalne ( $W_m$ ), kuna väike juurdekasv tsoonide kõverdumises annab väga suure  $Q_n$  juurdekasvu.



$$Q_s = Q_n + Q_{sc} = Q_n - eN_A W_m$$

9

## Tühjendatud ala pinnal ja elektrostaatiline potentsiaal



Elektrostaatiline potentsiaal

$\psi = \psi_s$  pooljuhi pinnal

$\psi = 0$  pooljuhi ruumis

10

## Elektrostaatiline potentsiaal

Elektronide ja aukude kontsentratsioonid võib avaldada kui

$$n_p = n_i e^{(E_F - E_i)/kT} \quad \& \quad p_p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

Siis antud juhul võime ka need avaldada elektrostaatilise potentsiaali kaudu:

$$n_p = n_i e^{(\psi - \psi_B)/kT} \quad \& \quad p_p = n_i e^{(\psi_B - \psi)/kT}$$

Positiivne, kui tsoonid kõverduvad allapoole

$E_i - E_F$

11

## Elektrostaatiline potentsiaal

Laengukandjate kontsentratsioonid pinnal avalduvad siis:

$$n_s = n_i e^{(\psi_s - \psi_B)/kT} \quad \& \quad p_s = n_i e^{(\psi_B - \psi_s)/kT}$$

Siis saame mitmed erinevad pinnapotentsiaali juhud:

$\psi_s < 0$  Aukude akumulatsioon (tsoonid kõverduvad üles)

$\psi_s = 0$  "Flat-band" tingimus

$0 < \psi_s < \psi_B$  Aukudest tühjendamine (tsoonid kõverduvad alla)

$\psi_s = \psi_B$  Omajuhtivuse tingimus ( $n_s = n_p = n_i$ )

$\psi_s > \psi_B$  Inversioon (tsoonid kõverduvad alla)

12

## Tühjendatud ala paksus (depletion width)

Pooljuhi pinna tühjendatud ala meenutab  $n^+$ - $p$  siiret, kus barjääri sisemise pinge asendame siin pinnapotentsiaaliga:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_s}{eN_A}}$$

Tugeval inversioonil oli  $n_s = N_A$ ,

$$n_i e^{(\psi_s(inv) - \psi_B)/kT} = n_i e^{e\psi_B/kT}$$

$$\psi_s(inv) \cong 2\psi_B = \frac{2kT}{e} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

13

## Tühjendatud ala paksus (depletion width)

Tugeval inversioonil saame maksimaalse tühjendatud ala paksuse:

$$W_m = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_s(inv)}{eN_A}} \cong \sqrt{\frac{2\epsilon_s 2\psi_B}{eN_A}}$$

$$W_m = \sqrt{\frac{4\epsilon_s kT \ln(N_A/n_i)}{e^2 N_A}}$$

14

## MOS-struktuur akumulatsiooni tingimustes.

$p$ -tüüpi Si

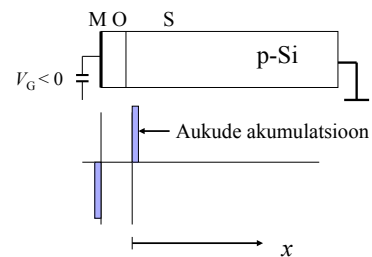
$V_G < 0$ .

Sarnane plaatkondensaatoriga!

$C_G = C_{ox}$

kus  $C_{ox} = (\epsilon_{ox} A) / x_{ox}$

Seega akumulatsiooni tingimustes on struktuuri mahtuvus võrdne oksiidikihi mahtuvusega.



15

## MOS-struktuur tühjenemise tingimustes.

Tühjendamise tingimus:

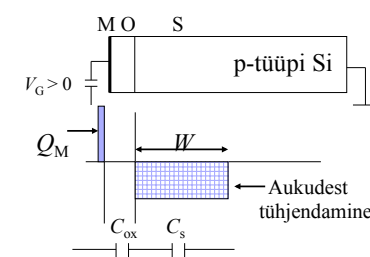
$V_G > 0$

Mõlemad mahtuvused liituvad:

$$\begin{aligned} C_{ox} &= \epsilon_{ox} A / x_{ox} \\ C_s &= \epsilon_{Si} A / W \end{aligned}$$

$$C_G = C_{ox} C_s / (C_{ox} + C_s)$$

$C_G$  sõltub pingest!!!



$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{Si}}{qN_A} \phi_s}$$

kus  $\phi_s$  on pinnapotentsiaal

16

## MOS-struktuur inversiooni tingimustes

$$V_G = V_T \text{ ja } V_G > V_T$$

Inversiooni tingimus:  $\phi_s = 2 \phi_F$

$$W = W_T = \left[ \frac{2\epsilon_{Si}}{qN_A} 2\phi_F \right]^{1/2}$$

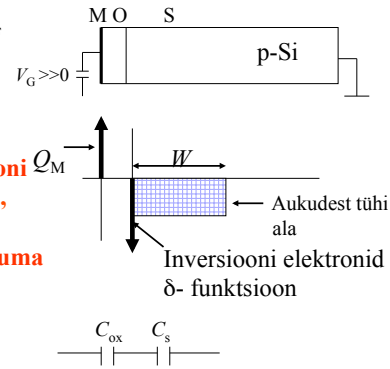
**Kõrgel sagedustel inversiooni elektronid ei jõua reageerida, seega metalli laengu balanseerimiseks peab muutuma pooljuhi siirdeala paksus.**

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} A / x_{ox}$$

$$C_s = \epsilon_{Si} A / W_T$$

$$C_G(\omega \rightarrow \infty) = C_{ox} C_s / (C_{ox} + C_s)$$

Seega,  $C_G$  on konstantne kui  $V_G \geq V_T$

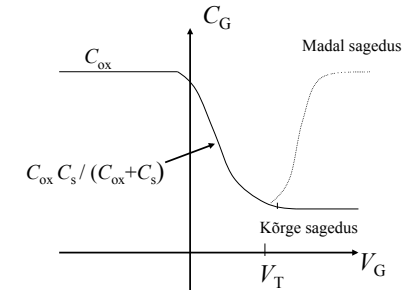


17

## MOS-kondensaator inversiooni tingimustes

Madalatel sagedustel jõuavad inversiooni elektronid reageerida ning kogumahtuvus on võrdne oksiidikihi mahtuvusega.

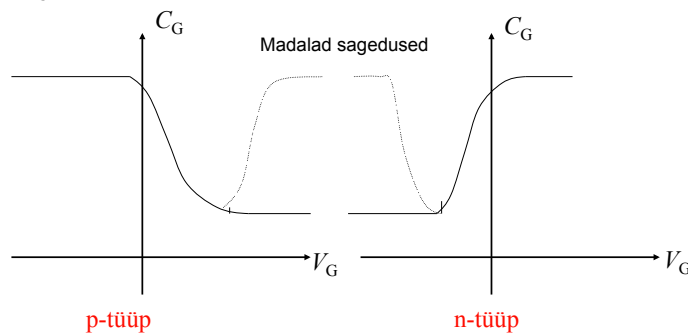
$$C_G(\omega \rightarrow 0) = C_{ox} = \epsilon_{ox} A / x_{ox}$$



p-tüüpi Si

18

## C-V sõltuvused reaalse MOS-struktuuri puhul p- ja n-tüüpi ränis

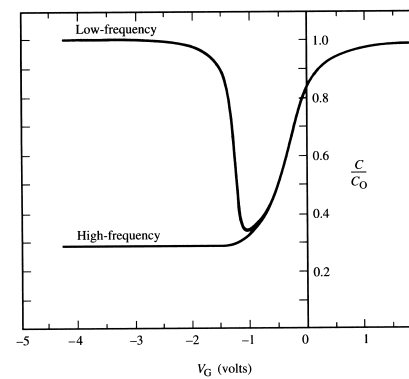


p-tüüp

n-tüüp

19

## Mõõdetud C-V sõltuvused n-tüüpi ränis.



$$N_D = 9.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$x_{ox} = 0.119 \text{ } \mu\text{m}$$

(b)

Figure 16.11

20