

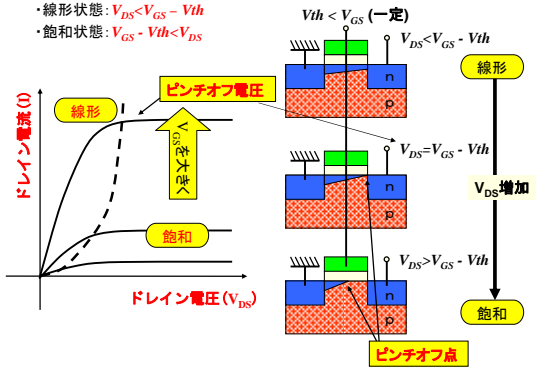
半導体工学(13)

宿題回答

電子情報デザイン学科 藤野 毅

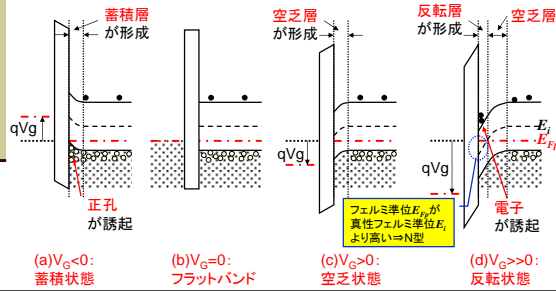
N型MOSTランジスタのドレイン電圧依存性

- 線形状態: $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$
- 飽和状態: $V_{GS} - V_{th} < V_{DS}$



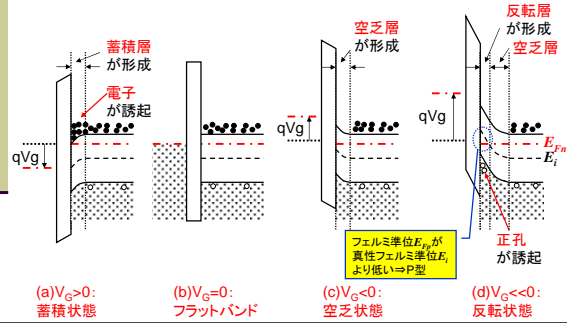
P型MOS構造のエネルギーバンドのVGS依存性

- $V_g=0V$ でフラットバンド条件を満たす場合のエネルギーバンド図
 - ゲート電極の仕事関数 ϕ_m とP型シリコンの仕事関数 ϕ_s が等しい
 - ゲート絶縁膜と半導体界面には界面準位が存在しない
 - 絶縁膜中には電荷が存在しない
 - 絶縁膜には電流が流れない



演習問題【7-1】

- N型MOS構造のエネルギーバンドのVGS依存性
- $V_g=0V$ でフラットバンド条件を満たす場合のエネルギーバンド図
 - ゲート電極の仕事関数 ϕ_m とN型シリコンの仕事関数 ϕ_s が等しい



反転状態としきい値電圧

- 前のスライドでの電荷分布を簡略化

$$Q_G = -Q_S = -Q_I - Q_B \quad (7.1)$$

$$V_G = V_{ox} + \phi_s \quad (7.2)$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad V_{ox} = \frac{Q_G}{C_{ox}} \quad (7.3)$$

(ϵ_{ox} は酸化膜誘電率)

$$V_G = \frac{Q_G}{C_{ox}} + \phi_s = -\frac{Q_S}{C_{ox}} + \phi_s = -\frac{Q_I + Q_B}{C_{ox}} + \phi_s \quad (7.4)$$

$$V_G = V_{th} \quad Q_I \approx 0 \quad \phi_s = 2 \cdot \phi_F \quad (7.5)$$

$$V_{th} = -\frac{Q_B}{C_{ox}} + 2 \cdot \phi_F \quad (7.5)$$

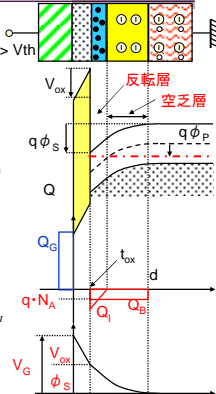
(7.4), (7.5)式より

$$C_{ox}(V_G - V_{th}) = -(Q_I + Q_B) + \phi_s C_{ox} + Q_B - 2 \cdot \phi_F C_{ox} = -Q_I$$

$$\therefore Q_I \approx -2 \cdot \phi_F \quad (\text{ただし } V_G > V_{th} \text{ のとき})$$

$$\therefore Q_I = -C_{ox}(V_G - V_{th}) \quad (7.6)$$

$$Q_B = -q \cdot N_A \cdot d \quad (7.7)$$



演習問題【7-2】

- ポアソンの式と電荷分布より

$$\begin{cases} \frac{d^2 \phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \\ \rho(x) = -qN_A \quad [0 < x < d] \end{cases} \quad (7.7)$$

- したがって

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = \frac{qN_A}{\epsilon}$$

- 境界条件は

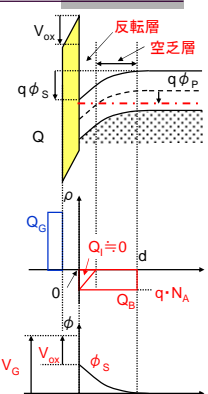
$$E(x=d) = 0 \quad \phi(x=d) = 0$$

- 最大電界 E_{max} は

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{qN_A}{\epsilon}(x-d) \quad \therefore E(x=d) = -\frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=d} = 0$$

$$\phi = \frac{qN_A}{2\epsilon}(x-d)^2 \quad \therefore \phi(x=d) = 0$$

$$\phi(x=0) = \phi_s \quad \text{より} \quad \phi_s = \frac{qN_A \cdot d^2}{2\epsilon}$$



アクセプタ密度と空乏層容量

- アクセプタ密度 N_A からフェルミポテンシャル ϕ_p

$$\phi_p = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$$

- 表面ポテンシャル ϕ_s

$$\phi_s = 2\phi_p$$

- 空乏層幅 d は

$$\phi_s = \frac{qN_A}{2\epsilon} d^2 \quad \therefore d = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} \phi_s} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_A} (2\phi_p)}$$

- 空乏層容量 C_D は

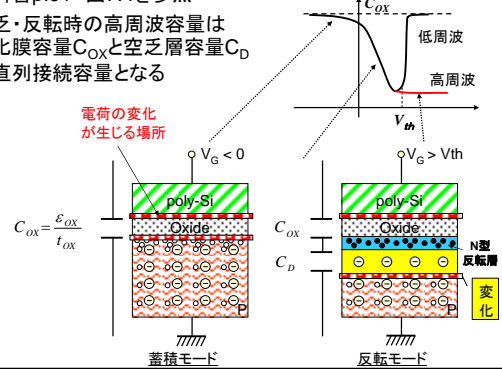
$$C_D = \frac{\epsilon}{d} = \sqrt{\frac{qN_A \epsilon}{4\phi_p}}$$

7

空乏・反転時のMOS容量

- 教科書 p.91 図7.4を参照

- 空乏・反転時の高周波容量は酸化膜容量 C_{OX} と空乏層容量 C_D の直列接続容量となる



8

演習問題回答

- 下記のMOSTランジスタのゲート容量 C_g を求めよ
酸化膜厚 $t_{ox}=5\text{nm}$
ゲート長 $0.25\ \mu\text{m}$ / ゲート幅 $2\ \mu\text{m}$
* シリコン酸化膜の比誘電率は3.9とする

単位面積あたりの酸化膜容量 C_{ox} は

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{t_{ox}} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.9}{5 \times 10^{-9}} = 6.9 \times 10^{-3} \text{ [F/m}^2\text{]}$$

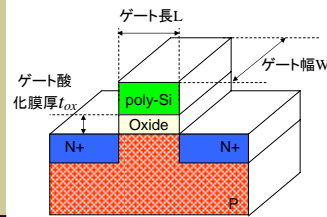
ゲート酸化膜容量 C_g は

$$C_g \approx L \times W \times C_{ox} = 0.25 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^{-6} \times 6.9 \times 10^{-3} \\ = 3.45 \times 10^{-15} \text{ [F/m}^2\text{]} = 3.45 \text{ [fF/m}^2\text{]}$$

9

MOSTランジスタの容量(復習)

- 単位面積あたりの酸化膜容量 C_{ox} は以下で示される



$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$\epsilon_{ox} = 3.9 \times \epsilon_0 \\ \text{酸化膜の比誘電率} \\ \epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ [F/m]} \\ t_{ox} : \text{ゲート酸化膜厚}$$

- ゲート酸化膜容量 C_g は以下で示される

$$C_g \approx L \times W \times C_{ox}$$

10

演習問題回答

- トランジスタの駆動電流を大きくするには
(ア) ゲート酸化膜厚(厚く/薄く)
(イ) ゲート長(大きく/小さく)
(ウ) ゲート幅(大きく/小さく)

トランジスタの駆動電流(ソースドレイン電流)は利得係数 $\beta = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox}$ に比例している。

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

(ア) β を大きくするには $C_{ox} \rightarrow$ 大 \Rightarrow ゲート酸化膜厚 $t_{ox} \rightarrow$ 小

(イ) β を大きくするにはゲート長 $L \rightarrow$ 小

(ウ) β を大きくするにはゲート幅 $W \rightarrow$ 大

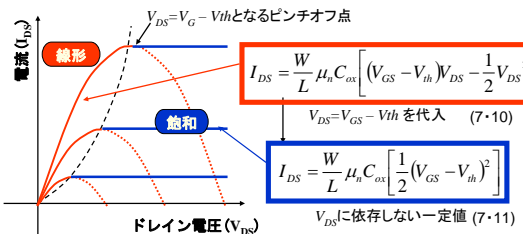
したがって答えは右のとおり 2. トランジスタの駆動電流を大きくするには

- (ア) ゲート酸化膜厚(厚く/薄く)
(イ) ゲート長(大きく/小さく)
(ウ) ゲート幅(大きく/小さく)

11

N型MOSTランジスタのドレイン電流式

- 線形領域と飽和領域とで2種類の式があるが、ピンチオフ電圧の定義 ($V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$) を覚えておけば線形式から飽和式が求まる。



- 上記の回路の特性値 $\frac{W}{L} \mu_n C_{ox}$ を利得係数 β と呼ぶ

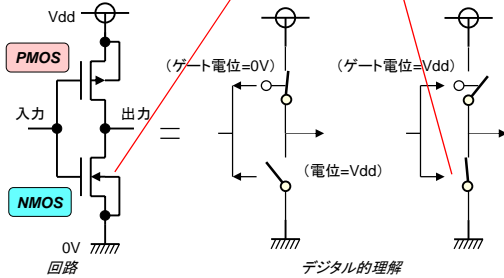
12

練習問題回答

3. CMOS回路でインバータを構成するとき

(ア) 0V側に接続するのは(NMOSトランジスタ/PMOSトランジスタ)

(イ) ゲート電圧がV_{dd}のときNMOSトランジスタは(ON/OFF)



13

練習問題回答

■ 以下のN型MOSトランジスタが(1)(2)の電圧で動作しているときのドレイン電流を計算せよ。

- ゲート長 $L=0.25[\mu\text{m}]$, ゲート幅 $W=10[\mu\text{m}]$
- しきい値電圧 $V_{th}=0.5\text{V}$
- 単位面積あたりの酸化膜容量 $C_{ox}=7 \times 10^{-3}[\text{F}/\text{m}^2]$
- 電子の実効移動度 $\mu_n=0.02[\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}]$

(1) ゲート電圧 $V_{GS}=2.5\text{V}$, ドレイン電圧 $V_{DS}=2.5\text{V}$

(2) ゲート電圧 $V_{GS}=2.5\text{V}$, ドレイン電圧 $V_{DS}=1.5\text{V}$

トランジスタの利得係数 β は

$$\beta = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} = \frac{10}{0.25} \times 0.02 \times 7 \times 10^{-3} = 5.6 \times 10^{-3}$$

$V_{DS}=V_{GS}-V_{th}$
 $=2\text{V}$ 以上で I_{DS} は飽和している。

(1) $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ なので飽和領域

$$I_{DS} = \beta \times \left[\frac{1}{2} (V_{GS} - V_{th})^2 \right] = 5.6 \times 10^{-3} \times \frac{1}{2} \times (2.5 - 0.5)^2 = 11.2 \times 10^{-3} = 11.2 \text{ [mA]}$$

(2) $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ なので線形領域

$$I_{DS} = \beta \times \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] = 5.6 \times 10^{-3} \times \left\{ (2.5 - 0.5) \times 1.5 - \frac{1}{2} \times 1.5^2 \right\} \\ = 10.5 \times 10^{-3} = 10.5 \text{ [mA]}$$

14