

Karta Ćwiczenia 1. Charakterystyki CMOS

Imię i Nazwisko: Andrzej Kapczyński Grupa L8 Semestr 7

Dzień tygodnia i godzina: wtorek 15:10

Data wykonania ćwiczenia: Podpis prowadzącego:

I. Przygotowanie do ćwiczenia

Wykonanie „przygotowania do ćwiczenia” jest warunkiem koniecznym dopuszczenia do ćwiczenia i powinno być przygotowane w domu.

Do niniejszej kartki dołącz (zszyte zszywaczem) pisane odręcznie (proszę o ręczne pisanie z wiadomych względów...) odpowiedzi na następujące zagadnienia:

Niektóre parametry technologii TSMC 65 nm wykorzystanej w laboratorium:

Nazwa, Symbole (SPICE symbol)	Wartość [jednostka]
Ruchliwość nośników - mobility μ (UO)	NMOS: $\mu = 110$ [$\text{cm}^2/\text{V s}$] PMOS: $\mu = 45$ [$\text{cm}^2/\text{V s}$]
Napięcie progowe – Threshold Voltage V_{th}/V_t (VTO)	NMOS: $V_{tn} = 0.4$ [V] PMOS: $V_{tp} = 0.48$ [V]

- Podaj znaczenie i **jednostki** podanych poniżej symboli używanych w opisie tranzystorów CMOS. Określ, które są stałymi, a które są różne dla NMOS i PMOS (wyróżnij je odpowiednio indeksem „n” i „p”).
 V_t , μ , β , W , L , t_{ox} , C_{ox} , $\epsilon = \epsilon_{SiO_2}$, ϵ_0
- Podaj wzór ogólny dla $\beta = f(\mu, \epsilon, t_{ox}, W, L)$
Wylicz współczynnik „k” podstawiając dane używanej w LAB technologii (patrz tabela) $\beta = k \cdot (W/L)$ dla NMOS i PMOS.
Przyjmując $L_n = L_p = 65$ nm i $W_n = 120$ nm wyznacz $W_p = ?$ aby $\beta_n = \beta_p$
- Napisz wzory opisujące zależność $I_{ds} = f(V_{ds})$ dla tranzystorów NMOS i PMOS w odpowiednich zakresach pracy. Wyjaśnij znaczenie wszystkich symboli użytych we wzorach, a w szczególności wskaż różnice we wzorach dla NMOS i PMOS.
Co oznacza pkt o wartości $|V_{gs} - V_t| = |V_{ds}|$?
Określ w jakim zakresie pracy znajduje się NMOS dla wartości: ($V_{gs} = 1$ V, $V_{ds} = 1$ V) oraz ($V_{gs} = 1$ V, $V_{ds} = 0.2$ V)
- Narysuj **dwa** schematy pozwalające na wyznaczenie charakterystyk $I_{ds} = f(V_{ds})$ tranzystorów NMOS i PMOS. Jasno określ polaryzacje i podłączenie źródeł.
- Wyjaśnij, co oznacza wartość V_{gs} , dla której prąd I_{ds} zaczyna płynąć. Odczytaj z modelu jego przybliżoną wartość i wpisz do tabeli 4 w przygotowane nawiasy.
- Wyjaśnij który/które parametry tranzystora może zmieniać projektant mając do dyspozycji daną technologię, aby zmieniać wartość prądu I_{ds} . Jakie są ograniczenia?

II. Wyniki symulacji

nr indeksu: _____

CZ. I. TRANZYSTOR NMOS

Tabela 1. Parametry tranzystora NMOS i źródeł polaryzujących	
Parametr	Wartość
ASIM_MODEL	NCH
Length	0.065u
Width	1
Subtype	P
W	200nm
VGS	1V
VDS	1.2V

Netlista układu:

* Circuit definition

M1 VDD Gt GROUND GROUND NCH L=0.065u W=200nm

* Source

VGS Gt GROUND DC 1V

VDS VDD GROUND DC 1.2V

Tabela 2. Wartość prądu odczytana za pomocą kursora dla:

Vds[V]	Ids[uA]
0.1	25.51309 mA
0.3	52.15923 mA
1.0	76.67086 mA
Średnia wartość prądu dla całego wykresu	56.314 mA

5.87016pA

Tabela 3. Dane odczytane z rodziny charakterystyk

Przebieg	Vgs	Ids dla Vds=0.2 V	Ids dla Vds=1.0 V
Krzywa najbliższa osi x	0V	1.6925	26.15695pA
	0.3V	25.45395nA	100.87721nA
	0.6V	5.24156uA	11.31068uA
	0.9V	32.25109uA	57.65474uA
Krzywa najdalsza od osi x	1.2V	59.91792uA	115.92567uA

* Simulation settings

.DC VDS 0.1 1.2 0.01

.STEP param VGS 0 1.2 0.3

* Probes

.PROBE DC I(M1)

.PROBE ALL

Tabela 4. Wyznaczenie najmniejszej wartości V_{gs} dla której $I_{ds} > 0.1 \mu A$	
$I_{ds} > 0.1 \mu A$ dla $0.1028 \mu A$	$V_{gs} = 0.29907 V$ ($0.4 V$)

Tabela 5 $I_{ds} = f(V_{ds})$ dla różnych szerokości tranzystora $V_{gs} = 1 V$, $V_{ds} = 1 V$	
$W = 0.36 \mu m$	$I_{ds} = 136.96174 \mu A$
$W = 5 * 0.36 \mu m = 0.18 \mu m$	$I_{ds} = 0.69474 mA$
$W = 10 * 0.36 \mu m = 3.6 \mu m$	$I_{ds} = 1.39164 mA$

Tabela 6 Maksymalny pobór mocy w zależności od temperatury	
Temp = $0^{\circ}C$	Pmax = $146.78 \mu W$
Temp = $50^{\circ}C$	Pmax = $141.28 \mu W$
Temp = $100^{\circ}C$	Pmax = $136.81 \mu W$

. PROBE DC P(MA)

 . PROBE DC I(MA)

 . TEMP 0 50 100

CZ. II. TRANZYSTOR PMOS

Tabela 7. Parametry tranzystora PMOS i źródeł polaryzujących

Parametr	Wartość
ASIM_MODEL	PCH
Length	0.065u
Width	1
Subtype	P
W	0.200nm
VSG	1V
VSD	1.2V

Netlista układu:

* Circuit definition

* MOS DEVICE

M1 GROUND GT VDD VDD PCH L=65n W=200nm

* Source

VSG VDD GT DC 1V

VSD VDD GROUND DC 1.2V

Tabela 8. Wartość prądu odczytana za pomocą kursora dla:

Vsd[V]	Isd[uA]
0.1	-12.99475uA
0.3	-27.10859uA
1.0	-41.54835uA
Średnia wartość prądu dla całego wykresu	-29.7135uA

Tabela 9. Dane odczytane z rodziny charakterystyk

Przebieg	Vsg	Isd dla Vsd=0.2 V	Isd dla Vsd=1.0 V
Krzywa najbliższa osi x	0V	-2.65213pA	-10.97728pA
	0.3V	-6.60001nA	-25.28096nA
	0.6V	-2.92062uA	-5.08090uA
	0.9V	-16.37262uA	-30.42350uA
Krzywa najdalsza od osi x	1.2V	-31.13313uA	-65.14094uA

Tabela 10. Wyznaczenie najmniejszej wartości Vsg dla której Isd>0.1 uA

Isd>0.1 uA dla -0.10185uA	Vsg= 0.34684V (0.48V)
---------------------------	-----------------------

Tabela 11 Isd=f(Vsd) dla różnych szerokości tranzystora

Vsg=1 V, Vsd=1 V

W=0.36 um	Isd= -68.19792uA
W=5*0.36 um=0.18 um	Isd= -297.34367uA
W=10*0.36 um=3.6 um	Isd= -578.88448uA

Tabela 12 Maksymalny pobór mocy w zależności od temperatury

Temp = 0°C	Pmax = 42.350 uW
Temp = 50°C	Pmax = 40.932 uW
Temp = 100°C	Pmax = 39.624 uW

Zadanie 1

V_t - napięcie progowe, jednostka [V] volt, różne dla NMOS i PMOS

$$V_{t_n} = 0.4V \quad V_{t_p} = -0.48V$$

μ - ruchliwość nośników, jednostka $\left[\frac{cm^2}{V \cdot s}\right]$, różne dla NMOS i PMOS

$$\mu_n = 110 \frac{cm^2}{V \cdot s} \text{ (ruchliwość elektronów)} \quad \mu_p = 45 \frac{cm^2}{V \cdot s} \text{ (ruchliwość dziur)}$$

β - współczynnik transkonduktancji, jest stałą charakterystyczną dla danego modelu tranzystora, jednostka [S] siemens

W - szerokość kanału } jednostka [m] metr, są charakterystyczne

L - długość kanału } dla danego modelu tranzystora

t_{ox} - grubość warstwy tlenowej krzemu SiO_2 izolującego elektrodę od bramki od kanału, jednostka [m], $t_{ox_n} = 2.6nm$ $t_{ox_p} = 2.8nm$

ϵ - przenikalność elektr. ośrodka, w którym indukowany jest kanał, jednostka $\left[\frac{F}{m}\right] \frac{farad}{metr}$, jest to stała $\epsilon = 3.97 \cdot \epsilon_0$

ϵ_0 - przenikalność elektryczna, jednostka $\left[\frac{F}{m}\right]$, jest to stała

$$\epsilon_0 = 8,854187 \dots \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

C_{ox} - pojemność warstwy tlenowej (izolacyjnej bramki) na jednostkę powierzchni bramki. Jest zależne od rodzaju tranzystora

Zadanie 2

Wzór ogólny dla $\beta = f(\mu, \epsilon, t_{ox}, W, L)$

$$\beta = k \cdot \frac{W}{L} = \mu \cdot C_{ox} \frac{W}{L}$$

β - transkonduktancja urządzenia C_{ox} - poj. tlenkowa na jedn.

W - szerokość kanału

L - dł. kanału

powierzchni bramki

μ - ruchliwość elektronów (NMOS)
ruchliwość dziur (PMOS)

a) NMOS

$$L_n = 65 \text{ nm} \quad W_n = 120 \text{ nm} \quad \mu_n = 110 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$V_{t_n} = 0.4 \text{ V} \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad t_{ox_n} = 2.6 \text{ nm}$$

$$\beta = k \cdot \frac{W}{L} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

$$\epsilon_{ox} = 3.9 \epsilon_0 \quad \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

$$\frac{W}{L} = 1.85 \quad k_n = \mu_n \cdot C_{ox}$$

$$k_n = 110 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \cdot \frac{3.9 \cdot \epsilon_0}{2.6 \text{ nm}} = \frac{110 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{\text{V} \cdot \text{s}} \cdot \frac{3.9 \cdot \epsilon_0}{2.6 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \frac{110 \cdot 10^{-4} \cdot 3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}}{\text{V} \cdot \text{s} \cdot 2.6 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= -4 + (-12) - (-9) = -4 - 12 + 9 = -7$$

$$C_{ox} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}}{2.6 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \frac{35.1345 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}}{2.6 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 13.513 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F}}{\text{m}^2}$$

$$k_n = 13.513 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F}}{\text{m}^2} \cdot 110 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} = 1446.83 \cdot 10^{-7} \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}} = \underline{0.000144683 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}}}$$

Odp ✓

$$B_n = 0.000144683 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}} \cdot 1.85 = 0.00026766 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$B_n = B_p$$

b) PMOS

$$k_p = \mu_p \cdot C_{ox} \quad C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3.9 \cdot \epsilon_0}{2.8 \text{ nm}} \quad \mu_p = 45 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \quad t_{ox_p} = 2.8 \text{ nm}$$

$$C_{ox} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}}{2.8 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = \frac{35.1124 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}}{2.8 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 12.539723 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F}}{\text{m}^2}$$

$$k_p = \frac{45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \cdot 12.539723 \cdot 10^{-3} \frac{\text{F}}{\text{m}^2} = 0.0005649 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

$$B_p = 0.00026766 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}} \quad L_p = 65 \text{ nm}$$

$$B_p = k_p \cdot \frac{W_p}{L_p}$$

$$0.00026766 \cdot 65 \text{ nm} = 0.0005649 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}} \cdot W_p$$

$$W_p = 307.981944 \text{ nm}$$

Odpowiedź: $k_p = 0.0005649 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}}$, $k_n = 0.000144683 \frac{\text{F}}{\text{V} \cdot \text{s}}$, $W_p = 307.981944 \text{ nm}$

Zadanie 3

$$I_{ds} = f(V_{ds})$$

Zakres pracy	NMOS	PMOS
wyłączony (OFF)	$V_{GS} < V_{th}$ $I_{ds} = 0$	$V_{SG} < V_{tp}$ $I_{ds} = 0$
włączony, nienasycony (ON, non-saturated)	$V_{GS} \geq V_{th}, V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ $I_d = \beta \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$	$V_{GS} = -V_{SG} < V_{tp}$ $I_{DP} = \frac{\beta_p}{2} [2(V_{SG} + V_{tp})V_{SD} - V_{SD}^2]$
włączony, nasycony (ON, saturated)	$V_{GS} \geq V_{th}, V_{DS} \geq V_{GS} - V_{th}$ $I_p = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_{th})^2$	$V_{SD} = V_{SG} + V_{tp}$ $I_{DP} = \frac{\beta_p}{2} (V_{SG} + V_{tp})^2$

V_{th}, V_{tp} - napięcie progowe

I_p - prąd drenu

V_{DS} - napięcie dren - źródło

β - transkonduktancja

V_{GS} - napięcie bramka - źródło

Różnica we wzorach

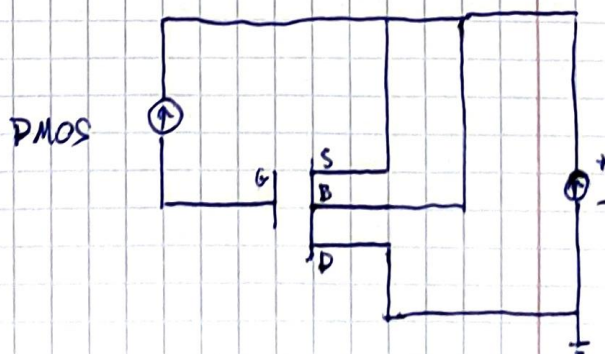
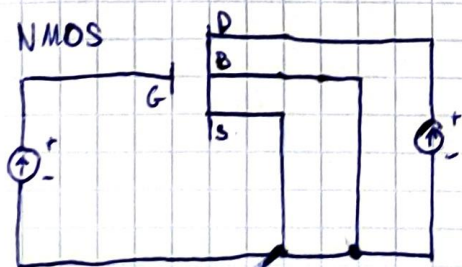
jest inny znak co spowodowane jest tym, że w tranzystorze PMOS prąd płynie w odwrotną stronę.

Punkt o wartości $|V_{GS} - V_t| = V_{DS}$, to punkt w którym tranzystor przechodzi ze stanu nienasyconego w nasycony

NMOS $V_{GS} = 1V$ $V_{DS} = 1V$ $V_{GS} - V_t = 0.6V$ - stan nasycony

$V_t = 0.4V$, $V_{GS} = 1V$ $V_{DS} = 0.2V$ $V_{GS} - V_t = 0.6V$ - stan nienasycony

Zadanie 4



Zadanie 5

Jeśli napięcie to jest mniejsze od napięcia progowego danego tranzystora, ten jest zamknięty a rezystancja jego kanału wynosi kilka megaomów. Gdy napięcie przyłożone do bramki jest większe od napięcia progowego tranzystor jest otwarty i między drenem D a źródłem S może płynąć prąd, którego wartość zależy od napięcia polaryzacji między drenem a źródłem.

Zadanie 6

~~Przebieg~~ 1

Projektant, przy planowaniu tranzystora może zmieniać jego szerokość i długość kanału. Są one wykorzystywane do obliczenia wartości β więc wpływają na wartość prądu I_{DS} (β znajduje się w wzorze na I_{DS}). Zachowanie tranzystora w obwodzie scalonym zależy od jego geometrii ($W:L$) dzięki temu wpływa to na szybkość działania czy wydajność prądową.