

| | | | | |
|--|------------|---------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Návrh analogových integrovaných obvodů Ústav mikroelektroniky FEKT VUT v Brně | | | Jméno Tomáš Vavrinec | ID 240893 |
| | | | Ročník 3. | Obor MET Skupina MET/3 |
| Spolupracoval | Měřeno dne | Odevzdáno dne | Hodnocení | |
| – | – | – | | |
| Název zadání Extrakce parametrů tranzistorů MOSFET ze SPICE modelu | | | | Č. úlohy 1 |

ZADÁNÍ ÚLOHY

Detailní popis jednotlivých úloh s návodem najdete v NAO_PC.pdf, který je dostupný v E-learningu.

- **Simulací získejte hodnoty prahového napětí U_{TH0} pro dvě různé řady rozměrů tranzistorů.**
 - konstantní poměr $W/L = 5$, $když L = 0.18; 0.3; 0.5; 0.8; 1; 2; 3; 5; 10$,
 - různé rozměry: $W/L = 0.22/0.18; 1/0.5; 2/0.5; 2/1; 5/1; 5/2; 10/5; 10/10; 40/10$,
 - výše uvedené dva body budou provedeny pro tranzistor NMOS i PMOS.
- **Závislost prahového napětí U_{TH} na U_{SB}/U_{BS} (bulk efekt) Simulací získejte hodnoty prahového napětí U_{TH} pro napětí U_{BS} (NMOS) resp. U_{SB} (PMOS) v rozsahu $0[V]$ až $500[mV]$ s krokem $50[mV]$.**
- **Závislost parametru modulační délky kanálu (λ) na délce kanálu (L) Simulací získejte hodnoty parametru λ tranzistoru NMOS a PMOS pro L v rozmezí $200[nm]$ až $10[\mu m]$.**

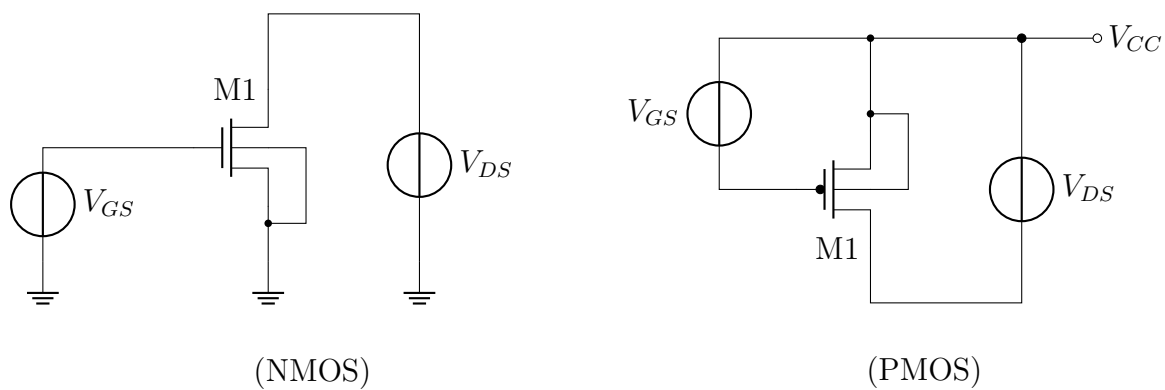
Bonusové otázky (1 b.)

- Popište, jak byste simulací (mimo analýzu `.op`) zjistili transkonduktanci g_m . Nakreslete schéma, popište nastavení a odečet hodnot.

1 Vypracování

1.1 Prahové napětí U_{TH0}

Mezi uzly V_{CC} a GND je umístěn napěťový zdroj s napětím $V_{CC} = 1.8[V]$, pro zjednodušení jen není uveden ve schematu, což bude platit i u dalších zapojení.



Obr. 1: Zapojení pro určení U_{TH0} pro tranzistor NMOS a PMOS

1.1.1 Prahové napětí U_{TH0} při konstantním poměru $W/L = 5$

```

1 .lib cmos018.txt
2 .STEP param lset list 0.18u, 0.3u, 0.5u, 0.8u, 1u, 2u, 3u, 5u, 10u
3 .param wset = 5*lset
4 .DC VGS 0.1 0.6 1m
5 .MEAS DC UTH FIND V(VG) WHEN Id(M1)=500n

```

Listing 1: Použitý kod simulace při konstantním poměru $W/L = 5$

```

LTspice 24.0.9 for Windows
Circuit: * C:\Users\TVavrinec\Documents\skola\NAO\lab-1\sim\Draft1N.asc
Start Time: Tue Feb 27 18:25:54 2024
solver = Normal
Maximum thread count: 16

Warning: Pd = 0 is less than W.
Warning: Ps = 0 is less than W.

.step lset=1.8e-07
.step lset=3e-07
.step lset=5e-07
.step lset=8e-07
.step lset=1e-06
.step lset=2e-06
.step lset=3e-06
.step lset=5e-06
tnom = 27
temp = 27
method = modified trap
.step lset=1e-05

Measurement: uth
step v(vg) at
1 0.417456 0.417456
2 0.43441 0.43441
3 0.418739 0.418739
4 0.396187 0.396187
5 0.386941 0.386941
6 0.368024 0.368024
7 0.362038 0.362038
8 0.357358 0.357358
9 0.353717 0.353717

Total elapsed time: 0.367 seconds.

```

(NMOS)

```

LTspice 24.0.9 for Windows
Circuit: * C:\Users\TVavrinec\Documents\skola\NAO\lab-1\sim\Draft1P.asc
Start Time: Tue Feb 27 19:43:43 2024
solver = Normal
Maximum thread count: 16

Warning: Pd = 0 is less than W.
Warning: Ps = 0 is less than W.

.step lset=1.8e-07
.step lset=3e-07
.step lset=5e-07
.step lset=8e-07
.step lset=1e-06
.step lset=2e-06
.step lset=3e-06
.step lset=5e-06
tnom = 27
temp = 27
method = modified trap
.step lset=1e-05

Measurement: uth
step v(vg) at
1 1.32926 0.470742
2 1.33485 0.465151
3 1.3419 0.458103
4 1.35183 0.448168
5 1.3566 0.443399
6 1.36797 0.432027
7 1.37193 0.428072
8 1.37495 0.425053
9 1.37687 0.423131

Total elapsed time: 0.411 seconds.

```

(PMOS)

Obr. 2: Printscreeny logů simulací při konstantním poměru $W/L = 5$ pro NMOS i PMOS

| $L[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|--------------|
| 0.18 | 0.417456 |
| 0.3 | 0.434410 |
| 0.5 | 0.418739 |
| 0.8 | 0.396187 |
| 1 | 0.386941 |
| 2 | 0.368024 |
| 3 | 0.362038 |
| 5 | 0.357358 |
| 10 | 0.353717 |

(NMOS)

| $L[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|--------------|
| 0.18 | 0.470742 |
| 0.3 | 0.465151 |
| 0.5 | 0.458103 |
| 0.8 | 0.448168 |
| 1 | 0.443399 |
| 2 | 0.432027 |
| 3 | 0.428072 |
| 5 | 0.425053 |
| 10 | 0.423131 |

(PMOS)

Tabulka 1: Výsledky simulace při konstantním poměru $W/L = 5$

1.1.2 Prahové napětí U_{TH0} při různém poměru W/L

```

1 .lib cmos018.txt
2 .param wset=table(n, 1,0.22u, 2,1u, 3,2u, 4,2u, 5,5u, 6,5u, 7,10u, 8,10u
   , 9,40u)
3 .param lset=table(n, 1,0.18u, 2,0.5u, 3,0.5u, 4,1u, 5,1u, 6,2u, 7,5u,
   8,10u, 9,10u)
4 .step param n 1 9 1
5 .meas DC UTH FIND V(VG) WHEN Id(M1)=100n*wset/lset
6 .dc VGS2 0 1 1m

```

Listing 2: Použitý kod simulace při různém poměru W/L

```

LTspice 24.0.9 for Windows
Circuit: * C:\Users\TVavrinec\Documents\skola\WAO\lab-1\sim\Draft2N.asc
Start Time: Tue Feb 27 20:03:06 2024
solver = Normal
Maximum thread count: 16

Warning: Pd = 0 is less than W.
Warning: Ps = 0 is less than W.

.step n=1

.step n=2

.step n=3

.step n=4

.step n=5

.step n=6

.step n=7

.step n=8
tnom = 27
temp = 27
method = modified trap
.step n=9

Measurement: uth
step v(vg) at
1 0.3822 0.3822
2 0.417049 0.417049
3 0.418458 0.418458
4 0.38664 0.38664
5 0.386941 0.386941
6 0.368009 0.368009
7 0.357377 0.357377
8 0.353754 0.353754
9 0.35372 0.35372

Total elapsed time: 0.492 seconds.

```

(NMOS)

```

LTspice 24.0.9 for Windows
Circuit: * C:\Users\TVavrinec\Documents\skola\WAO\lab-1\sim\Draft2P.asc
Start Time: Tue Feb 27 20:04:21 2024
solver = Normal
Maximum thread count: 16

Warning: Pd = 0 is less than W.
Warning: Ps = 0 is less than W.

.step n=1

.step n=2

.step n=3

.step n=4

.step n=5

.step n=6

.step n=7

.step n=8
tnom = 27
temp = 27
method = modified trap
.step n=9

Measurement: uth
step v(vg) at
1 1.39248 0.407517
2 1.34555 0.454446
3 1.34245 0.457553
4 1.35694 0.443062
5 1.3566 0.443399
6 1.36777 0.432227
7 1.37471 0.425288
8 1.37652 0.423483
9 1.37684 0.423156

Total elapsed time: 0.500 seconds.

```

(PMOS)

Obr. 3: Printscreeny logů simulací různých poměrů W/L pro NMOS i PMOS

| $L[\mu m]$ | $W[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|------------|--------------|
| 0.22 | 0.18 | 0.382200 |
| 1 | 0.5 | 0.417049 |
| 2 | 0.5 | 0.418458 |
| 2 | 1 | 0.386640 |
| 5 | 1 | 0.386941 |
| 5 | 2 | 0.368009 |
| 10 | 5 | 0.357377 |
| 10 | 10 | 0.353754 |
| 40 | 10 | 0.353720 |

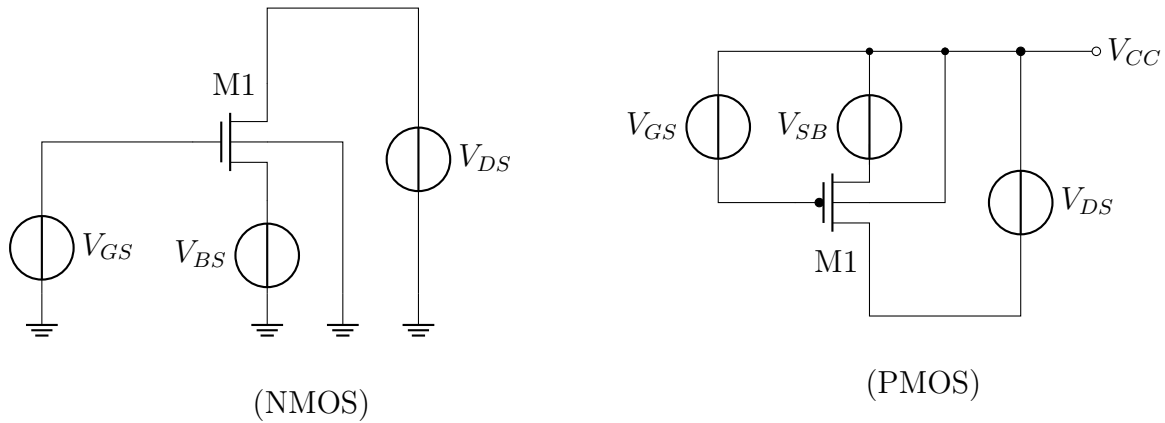
(NMOS)

| $L[\mu m]$ | $W[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|------------|--------------|
| 0.22 | 0.18 | 0.407517 |
| 1 | 0.5 | 0.454446 |
| 2 | 0.5 | 0.457553 |
| 2 | 1 | 0.443062 |
| 5 | 1 | 0.443399 |
| 5 | 2 | 0.432227 |
| 10 | 5 | 0.425288 |
| 10 | 10 | 0.423483 |
| 40 | 10 | 0.423156 |

(PMOS)

Tabulka 2: Výsledky simulace při různém poměru $W/L = 5$

1.2 Závislost prahového napětí U_{TH} na napětí bulku



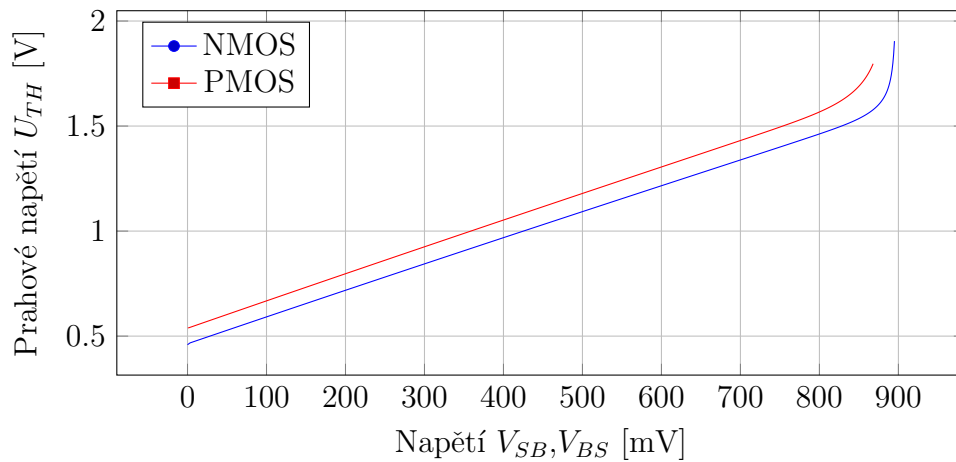
Obr. 4: Zapojení pro určení závislosti U_{TH} na napětí bulku pro tranzistor NMOS a PMOS

```

1 .lib cmos018.txt
2 .STEP VSB 0 1 1m
3 .DC VGS 0 2 1m
4 .MEAS DC UTH FIND V(VG) WHEN Id(M1)=500n

```

Listing 3: Kod simulace pro určení závislosti U_{TH} na napětí bulku



Obr. 5: Závislost U_{TH} na napětí bulku

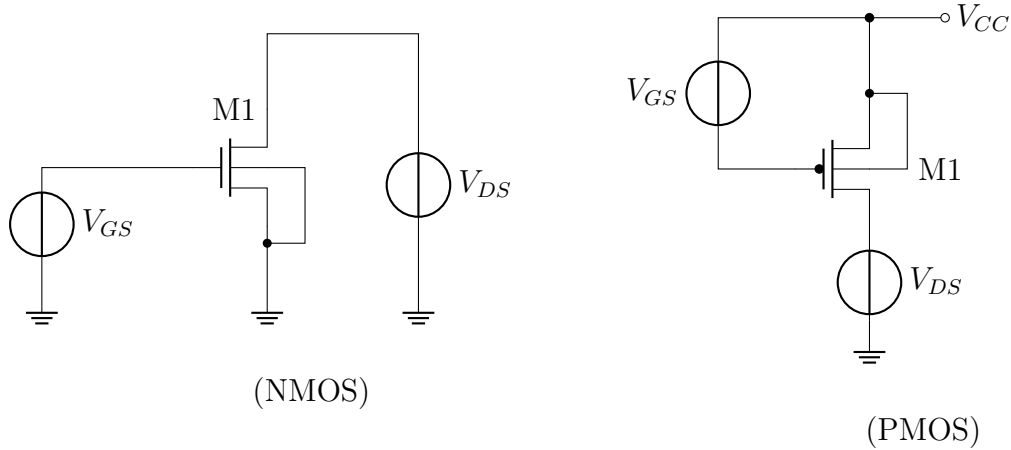
Z grafu jsou odstraněni hodnoty U_{TH} při vysokém napětí V_{SB} res V_{BS} , protože v simulaci vycházeli nulové. Z grafu je patrné, že U_{TH} je pro napětí V_{SB} res V_{BS} menší než 0.8[V], závislé zhruba lineárně.

| $V_{SB}[V]$ | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NMOS [V] | 0.71819 | 0.78115 | 0.84387 | 0.96864 | 1.09260 |
| PMOS [V] | 0.79697 | 0.86120 | 0.92520 | 1.05258 | 1.17922 |

Tabulka 3: U_{TH} pro různá napětí bulku

1.3 Závislost modulační délky kanálu (λ) na délce kanálu (L)

Mezi uzly V_{CC} a GND je umístěn napěťový zdroj s napětím $V_{CC} = 1.8[V]$, pro zjednodušení jen není uveden ve schematu, což bude platit i u dalších zapojení.



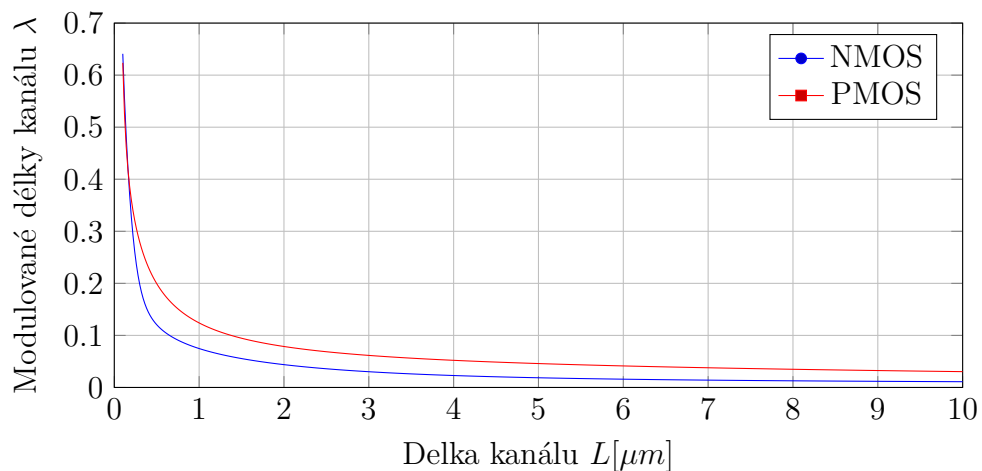
Obr. 6: Zapojení pro určení závislosti modulační délky kanálu λ na délce kanálu L

```

1 .lib cmos018.txt
2 .step param lset 0.1u 10u 0.02u
3 .param wset=9.2*lset ; pro PMOS
4 .param wset=2.3*lset ; pro NMOS
5 .meas DC ID1 FIND Id(M1) WHEN V(VD)=0.5
6 .meas DC ID2 FIND Id(M1) WHEN V(VD)=1.3
7 .meas DC ID0 FIND Id(M1) WHEN V(VD)=0.9
8 .meas rout param (1.3-0.5)/(ID2-ID1)
9 .meas lambda param 1/(ID0*rout)
10 .dc UDS 0.5 1.3 10m

```

Listing 4: Kod simulace použití pro získání závislosti modulační délky kanálu λ na délce kanálu L



Obr. 7: Závislost U_{TH} na napětí bulku

| $L[\mu m]$ | 0.5 | 0.8 | 1 | 1.2 | 2 | 5 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| NMOS $\lambda[V^{-1}]$ | 0.120549 | 0.0870843 | 0.0747581 | 0.065668 | 0.0438342 | 0.0186193 |
| PMOS $\lambda[V^{-1}]$ | 0.199475 | 0.14448 | 0.123983 | 0.109605 | 0.0787029 | 0.0459147 |

Tabulka 4: λ pro různé délky kanálu L

2 Závěr

| $L[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|--------------|
| 0.18 | 0.417456 |
| 0.3 | 0.434410 |
| 0.5 | 0.418739 |
| 0.8 | 0.396187 |
| 1 | 0.386941 |
| 2 | 0.368024 |
| 3 | 0.362038 |
| 5 | 0.357358 |
| 10 | 0.353717 |

(NMOS)

| $L[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|--------------|
| 0.18 | 0.470742 |
| 0.3 | 0.465151 |
| 0.5 | 0.458103 |
| 0.8 | 0.448168 |
| 1 | 0.443399 |
| 2 | 0.432027 |
| 3 | 0.428072 |
| 5 | 0.425053 |
| 10 | 0.423131 |

(PMOS)

Tabulka 1: Výsledky simulace při konstantním poměru $W/L = 5$

| $L[\mu m]$ | $W[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|------------|--------------|
| 0.22 | 0.18 | 0.382200 |
| 1 | 0.5 | 0.417049 |
| 2 | 0.5 | 0.418458 |
| 2 | 1 | 0.386640 |
| 5 | 1 | 0.386941 |
| 5 | 2 | 0.368009 |
| 10 | 5 | 0.357377 |
| 10 | 10 | 0.353754 |
| 40 | 10 | 0.353720 |

(NMOS)

| $L[\mu m]$ | $W[\mu m]$ | $U_{TH0}[V]$ |
|------------|------------|--------------|
| 0.22 | 0.18 | 0.407517 |
| 1 | 0.5 | 0.454446 |
| 2 | 0.5 | 0.457553 |
| 2 | 1 | 0.443062 |
| 5 | 1 | 0.443399 |
| 5 | 2 | 0.432227 |
| 10 | 5 | 0.425288 |
| 10 | 10 | 0.423483 |
| 40 | 10 | 0.423156 |

(PMOS)

Tabulka 2: Výsledky simulace při různém poměru $W/L = 5$

| $V_{SB}[V]$ | 0.2 | 0.25 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NMOS $[V]$ | 0.71819 | 0.78115 | 0.84387 | 0.96864 | 1.09260 |
| PMOS $[V]$ | 0.79697 | 0.86120 | 0.92520 | 1.05258 | 1.17922 |

Tabulka 3: U_{TH} pro různá napětí bulku

| $L[\mu m]$ | 0.5 | 0.8 | 1 | 1.2 | 2 | 5 |
|------------------------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| NMOS $\lambda[V^{-1}]$ | 0.120549 | 0.0870843 | 0.0747581 | 0.065668 | 0.0438342 | 0.0186193 |
| PMOS $\lambda[V^{-1}]$ | 0.199475 | 0.14448 | 0.123983 | 0.109605 | 0.0787029 | 0.0459147 |

Tabulka 4: λ pro různé délky kanálu L

Reference