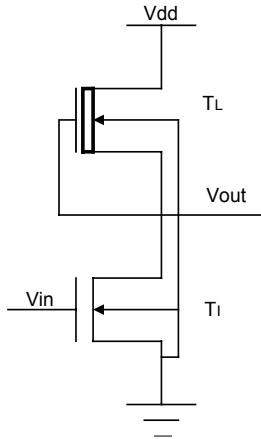


שאלה 1 : מהפך עם עומס Depletion

נתון המהפך שבשרטוט, עם עומס החלשת הולכה, מקוצר G-S.



נתונים:

$$K' = 20 \mu A/V^2 \quad V_{TI} = 1V \quad V_{TLo} = -3V$$

$$\gamma = 0.37 \quad |2\phi_F| = 0.6V \quad (W/L)_I = 2 \quad (W/L)_L = 0.5$$

מצא: $V_{IL}, V_{IH}, V_{OL}, V_{OH}$

פתרון:

V_{OH} :

בהנחה ש $V_{OL} < V_{TI}$ (נוודא בסעיף ב'), אזי V_{OH} יתקבל במוצא כאשר בכניסה $V_{in} = V_{OL} < V_{TI}$, כלומר, T_I קטוע.

מתח המוצא יעלה עד אשר $V_{DSL} = 0V$ או $V_{GSL} = V_{TL}$, כלומר מתח המוצא יגיע עד ל V_{DD} אם T_L לא יקטע (מוליך בתחום הלינארי).

נבדוק האם זה מתקיים, כלומר האם $V_{GSL} = 0 > V_{TL}$ ($V_{out} = 5V$) כאשר V_{TL} מושפע מאפקט המצע.

$$V_{GSL} = 0 > V_{TLo} + \gamma \left(\sqrt{|V_{BSL}| + |2\phi_F|} - \sqrt{|2\phi_F|} \right) = -3 + 0.37(\sqrt{5 + 0.6} - \sqrt{0.6}) = -2.4V$$

כלומר, גם כאשר $V_{out} = 5V$, עדיין T_L בהולכה, אם כי לא זורם בו זרם (נוסחת הזרם במצב לינארי כאשר $V_{DS} = 0V$)

$$V_{OH} = 5V$$

V_{OL} :

על פי הגדרה: $V_{OL} = V_{out}(V_{in} = V_{OH})$ (V_{OH} שמצאנו קודם)

מאחר ו V_{out} נמוך (V_{DSL} קטן) נניח כי T_I במצב אוהמי, ואילו V_{DSL} יהיה גבוה, ולכן נניח כי T_L ברוויה (יש לוודא הנחות אלו עם קבלת הפתרון).

נמצא את V_{OL} על ידי השוואת זרמי T_I ו T_L כשהם נתונים כפונקציה של V_{OH} :

$$I_{DI} = \frac{K_I}{2} [2(V_{OH} - V_{TI})V_{OL} - V_{OL}^2] = \frac{K_L}{2} (0 - V_{TL})^2 = I_{DL}$$

אם אנו מניחים כי V_{OL} נמוך, הרי ניתן להזניח את V_{OL}^2 בנוסחת I_{DI} ולפתור משוואה לינארית ולא ריבועית

V_{TL} מושפע מאפקט מצע, אך מאחר ואנו מניחים כי V_{OL} (V_S של T_L) נמוך, אפקט זה חלש ונוכל להזניח אותו.

בהזנחת אפקט המצע נקבל משוואה ריבועית:

$$2[2(5-1)V_{OL} - V_{OL}^2] = 0.5 * 3^2 \Rightarrow V_{OL} = 0.292V$$

התוצאה השניה ($V_{OL} = 7.7V$) איננה פיזיקלית.

בהזנחת האבר V_{OL}^2 נקבל $V_{OL} = 0.281V$. (במקרה זה קלות פתרון המשוואה הריבועית

איננה מחייבת הזנחה זו).

$V_{OL} < V_{TI}$ (בסעיף הקודם) מתקיים.

בדיקת ההנחות:

$$V_{DSL} = V_{OL} < V_{GSI} - V_{TI} = 5 - 1$$

T_I לינארי:

$$V_{DSL} = 5 - V_{OL} > V_{GSL} - V_{TL} = 0 - 3$$

T_L ברוויה:

$$:V_{IL}$$

T_L ברוויה, T_L אוהמי (מדוע?)

$$I_{DI} = \frac{K_I}{2} (V_{in} - V_{TI})^2 = \frac{K_L}{2} [2(-V_{TL}(V_{out})) (V_{DD} - V_{out}) - (V_{DD} - V_{out})^2] = I_{DL}$$

משוואה זו מתארת אופיין $V_{out}(V_{in})$. יש למצא מתי אופיין זה בשיפוע -1.
על ידי גזירת פונקציה סתומה ואם לא מתחשבים באפקט מצע (זה לא אומר שמזניחים אותו, אלא שמתייחסים ל V_{TL} כקבוע), מקבלים:

$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -\frac{K_I (V_{IL} - V_{TI})}{K_L (|V_{TL}| - V_{DD} + V_{out})} = -1$$

קיבלנו לכן שתי משוואות עם שני נעלמים אשר בהצבה של אחת בשניה (למשל חילוך V_{IL} בשנייה והצבה בראשונה) נותן משוואה ריבועית. פתרון המשוואה הריבועית נותן לנו את V_{IL} ו V_{out} מתאים עבור V_{TL} קבוע (אותו יש להניח מראש).

כעת ניתן מתוך V_{out} שקיבלנו לחשב את V_{TL} המתאים, על פי נוסחת אפקט המצע, להציב במשוואה הריבועית שקיבלנו, ולקבל שוב V_{IL} ו V_{out} . ניתן, על כן, להמשיך באיטרציות עד אשר ההתכנסות היא מספקת. הפתרון שמתקבל :
 $V_{IL}=1.5V$; $V_{out}=4.7V$

$$:V_{IH}$$

T_L ברוויה, T_L אוהמי (מדוע?)

$$I_{DI} = \frac{K_I}{2} [2(V_{in} - V_{TI})V_{out} - V_{out}^2] = \frac{K_L}{2} (-V_{TL}(V_{out}))^2 = I_{DL}$$

במשוואה זו ניתן להזניח את אפקט המצע (למה כאן, בניגוד לחישוב V_{IL} יש סיכוי שההזנחה מוצדקת?), ולכן נקבל:

$$(*)V_{in} = \frac{V_{TL}^2}{2K_R V_{out}} + 0.5V_{out} + V_{TI}$$

$$K_R = \frac{K_I}{K_L}$$

ונדרוש שיפוע -1:

$$\frac{dV_{out}}{dV_{in}} = -1 \Rightarrow -\frac{V_{TL}^2}{2K_R V_{out}^2} + 0.5 = -1 \Rightarrow V_{out} = \frac{|V_{TL}|}{\sqrt{3K_R}} = 0.86V$$

נציב ב (*) ונקבל : $V_{IH}=2.7V$.

נבדוק האם הזנחת אפקט המצע מוצדקת:

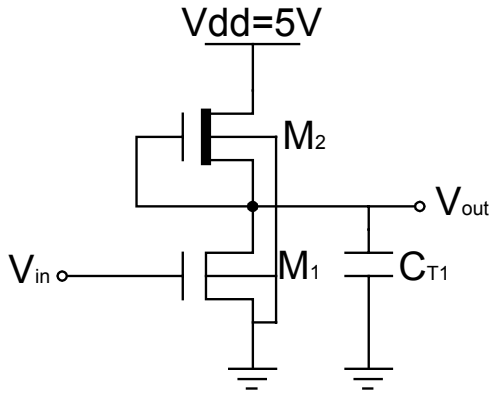
$$V_{TL}(V_{out}) = -3 + 0.37(\sqrt{0.86 + 0.6} - \sqrt{0.6}) = -2.84V$$

זוה קרוב ל $V_{TLo} = -3V$. ההנחה מותרת.

אם לא רוצים להזניח, ניתן להמשיך ולבצע אותו חישוב עבור $V_{TLo} = -2.84V$ ולהתכנס באיטרציות, כמו בחישוב V_{IL} , עד רמת הדיוק הרצויה.

תרגיל מס' 1:

נתון המהפך הבא:



$$C_{T1} = 40 \text{ pF} \quad K_1 = 40 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$\gamma = 0.37 V^{\frac{1}{2}} \quad K_2 = 10 \frac{\mu A}{V^2}$$

$$V_{T_{01}} = 1V \quad V_{T_{02}} = -3V$$

$$V_{DD} = 5V \quad 2\phi_F = -0.54V$$

יש לחשב את זמני המיתוג $t_{p_{LH}}$, $t_{p_{HL}}$ כאשר מניחים שינוי חד בכניסה (מדרגה).

פתרון:

מצאנו בתרגיל הכיתה הקודם כי עבור מעגל זה מתקיים: $V_{OH} = 5V$; $V_{OL} = 0.3V$.

t_{PLH}

שינוי המוצא מ- low ל- high יתרחש כאשר הכניסה תשתנה מ- low ל- high. נניח כי $V_{in} = 0V$ לאחר המעבר. M2 פתוח ויטען את C_{T1} (שמתחו היה נמוך בטרם המיתוג) עד למתח של V_{DD} .
בהתחלה:

$$V_{out}(t=0) = V_{OL} = 0.3V$$

$$I = \frac{K_2}{2} \left(V_{GS_2} - V_{T_2} \right)^2 = 44 \mu A$$

בהתחלה

כולל אפקט המצע

M2 מוליך ברוויה

בסוף:

המתח במוצא מגיע מגיע ל- 50% מהשינוי בו,

$$V_{out}(50\%) = V_{OL} + \frac{1}{2}(V_{OH} - V_{OL}) = 2.65V$$

$$V_{T_2}(V_{SB} = 2.65V) = -2.6V$$

$$I(50\%) = \frac{K_2}{2} \left[2(V_{GS_2} - V_{T_2})V_{DS_2} - V_{DS_2}^2 \right] = \frac{K_2}{2} \left[-2V_{T_2}(V_{DD} - V_{50\%}) - (V_{DD} - V_{50\%})^2 \right] = 34 \mu A$$

סופי

M2 מוליך באוהמי

$$I_{av} = \frac{1}{2} \left(I_{\text{בהתחלה}} + I_{\text{בסוף}}(50\%) \right) = 38 \mu A$$

זרם הטעינה הממוצע:

הזמן:

$$t_{p_{LH}} = \frac{C_{T12} \frac{1}{2} (V_{OH} - V_{OL})}{I_{av}} = 2.48 \mu \text{sec}$$

t_{PHL}

שינוי המוצא מ-high ל-low יתרחש עקב פתיחת M1 להולכה. השינוי נגרם כתוצאה משינוי במתח V_{in} מנמוך לגבוה. במצב זה יפרק הקבל C_{T1} דרך M1. יש לשים לב כי M2 מוליך "ומפריע" לתהליך הפריקה.

בהתחלה: $V_{out} = V_{OH} = 5V$

M2 אינו מוליך שכן $V_{DS2} = 0V$, כלומר M1 פורק בהתחלה לבד את הקבל כשהוא

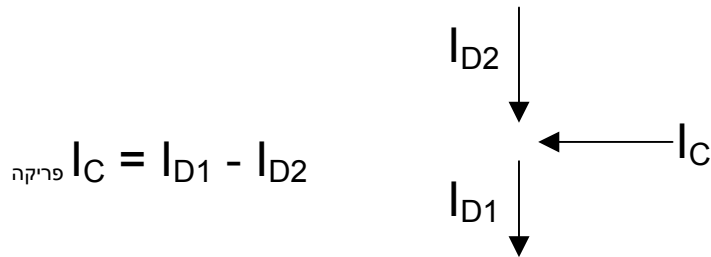
מוליך ברוויה, $I = \frac{K_1}{2} (V_{GS1} - V_{T1})^2 = 320 \mu A$ בהתחלה

בסוף:

השינוי במוצא הגיע ל-50% מערך השינוי האפשרי בין V_{OH} ל- V_{OL} כלומר ל- $V_{out}(50\%) = 2.65V$. במצב זה M1 באוהמי ו-M2 באוהמי.

זרם הפריקה של הקבל הינו ההפרש בין הזרם ב-M1 והזרם ב-M2:

בסוף $I(50\%) = I_{D1} - I_{D2} = \frac{K_1}{2} [2(V_{GS1} - V_{T1})V_{DS1} - V_{DS1}^2] - \frac{K_2}{2} [2(V_{GS2} - V_{T2})V_{DS2} - V_{DS2}^2] = 247 \mu A$



זרם פריקה ממוצע: $I_{av} = 283 \mu A$

הזמן:

$$t_{p_{HL}} = \frac{C_{T12} \frac{1}{2} (V_{OH} - V_{OL})}{I_{av}} = 0.34 \mu \text{sec}$$