

פתרון תרגיל בית 2שאלה 1

נתון טרנזיסטור MOSFET בעל מצע מסוג p-type.

נתון :

$$\varepsilon_c = 6.1 \cdot 10^4 \frac{V}{cm}; V_G = 1 V; V_T = 0.3 V;$$

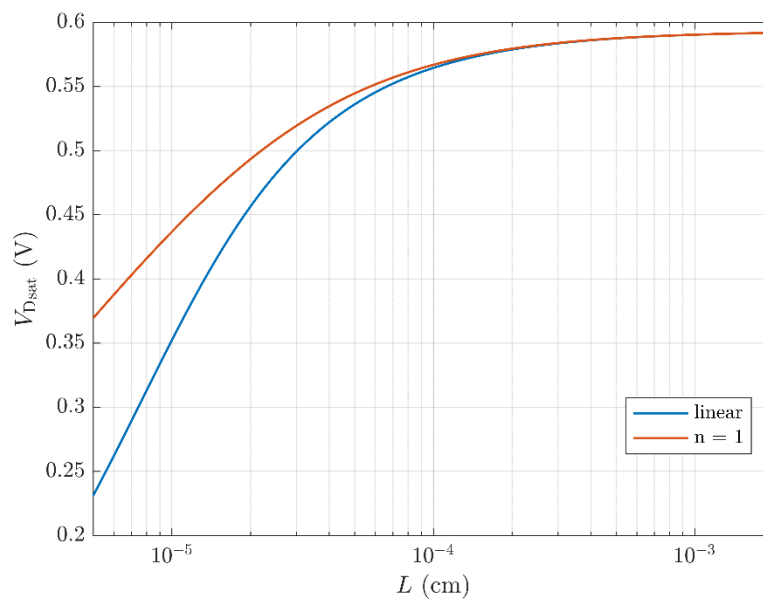
$$M = 1.18; \mu_n = 1450 \frac{cm^2}{Vs}; C_{ox} = 20 \frac{nF}{cm^2}; z/L = 12$$

א. השפעת היחס בין השדה למהירות נושאי המטען

a. שרטט עקומת V_{Dsat} כתלות ברוחב התעלה על-פי המודל הלינארי למקוטעין, ואת המודל על-פי

$n = 1$ (בנוסחה 1 הרצאה 4).

ערכי רוחב התעלה (L) שיש לקחת בחשבון הם מ $0.05 [\mu m]$ עד $20 [\mu m]$.



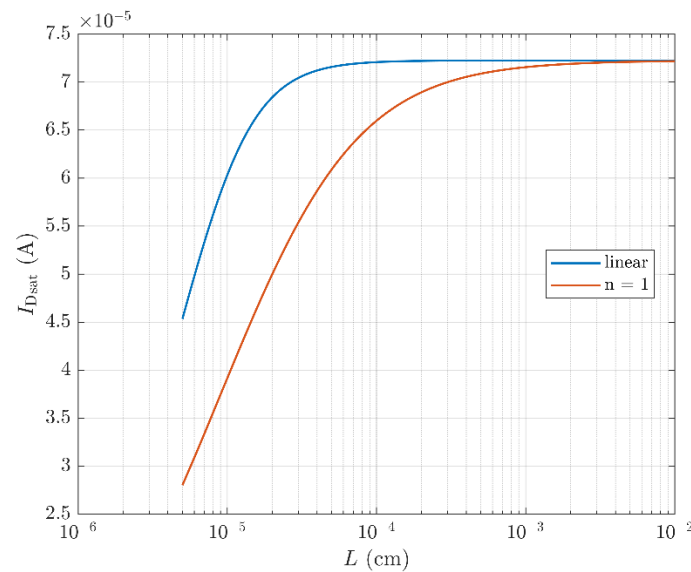
מה ניתן להסיק על התלות בין אורך התעלה ו V_{Dsat} ?

1. מתח הרוויה של טרנזיסטור בעל תעלה ארוכה ($L > 10^4 [cm]$) עבור הטרנזיסטור הנתון) מתלכד עפ"י שני המודלים. עם הצרות התעלה ($L < 10^4 [cm]$) הסטייה בין מתח הרוויה שמחושב עפ"י שני המודלים גדלה.
2. מתקבל ערך מתח רוויה גבוה יותר עבור תעלה ארוכה יותר
3. אפשר לראות שההבדל משמעותי רק עבור תעלות ברוחב של פחות ממיקרון אחד. מאחר והמודל לינארי למקוטעין צופה רווית זרם עבור שדות נמוכים יותר, מתח הרוויה שהוא צופה נמוך יותר

b. שרטט עקומת I_{Dsat} כתלות ברוחב התעלה על-פי המודל הלינארי למקוטעין ואת המודל על-פי

$n = 1$ (בנוסחה 1 הרצאה 4).

ערכי רוחב התעלה (L) שיש לקחת בחשבון הם מ $0.05 [\mu m]$ עד $100 [\mu m]$. יש לקחת בחשבון את ערכי V_{Dsat} שחושבו בסעיף הקודם.



מה ניתן להסיק על התלות בין אורך התעלה ו I_{Dsat} ?

1. זרם הרוויה של טרנזיסטור בעל תעלה ארוכה ($L > 10^3 [cm]$) עבור הטרנזיסטור הנתון) מתלכד עפ"י שני המודלים. עם הצרות התעלה ($L < 10^3 [cm]$) הסטייה בין זרם הרוויה שמחושב עפ"י שני המודלים גדלה. אולי כדאי בשאלה להרחיב את הטווח של ציר X כדי שיהיה ברור באיזה תחום זרמי הרוויה מתלכדים.
2. מתקבל ערך זרם רוויה גבוה יותר עבור תעלה ארוכה יותר.
3. בניגוד למה שראינו קודם, ההבדל בין המודלים ניכר כמעט בכל רוחב תעלה. עם זאת, בניגוד למה שראינו קודם, המודל הליניארי צופה זרם גבוה יותר.

הקוד עבור סעיף a ו b :

```
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex');

set(groot, 'defaultLegendLocation', 'best')
set(groot, 'defaultLegendOrientation', 'vertical')

set(groot, 'defaultAxesFontSize', 12);
%%Tutorial 4%%
clear all;
clc

%%Diode Parameters%%
V_G = 1; %[V]
V_T = 0.3; %[V]
M = 1.18; %unitless
E_crit = 6.1e4; %[V/cm]
c_ox = 20e-9; %[F/cm^2]
mu_n = 1450; %[cm^2/Vs]

% L = 10e-4; %[cm]
% L = linspace(0.05e-4, 20e-4, 100); %[cm]
L = logspace(log10(0.05e-4), log10(20e-4), 100); %[cm]
z = 12 * L; %[cm]

%%Linear approximation

V_Dsat_lin = L .* E_crit + (V_G - V_T) ./ M - sqrt((L .* E_crit) .^ 2 + ((V_G - V_T) ./ M) .^ 2); %[V]

I_Dsat_lin = (z .* mu_n .* c_ox ./ L) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_lin) .* V_Dsat_lin; %[A]
```

```

%%n=1

V_Dsat_n1 = L .* E_crit .* (sqrt(1 + 2 .* (V_G - V_T) ./ (M .* L .* E_crit)) - 1); %[V]

I_Dsat_n1 = (z .* mu_n .* c_ox .* E_crit ./ (L .* E_crit + V_Dsat_n1)) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .*
V_Dsat_n1) .* V_Dsat_n1; %[A]

fig = figure('units','centimeters','outerposition',[0, 0, 0.8 * 21.0, 0.5 * 29.7]);

semilogx( ...
    L, ...
    V_Dsat_lin, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

hold on;
grid on;

semilogx( ...
    L, ...
    V_Dsat_n1, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

legend( ...
    'linear', ...
    'n = 1' ...
)

xlabel('$L$ ($\mathrm{cm}$)');
ylabel('$\{V_{\mathrm{D}}\}_{\mathrm{sat}}$ ($\mathrm{V}$)');

set(fig,'Units','Inches');
pos = get(fig,'Position');
set(fig,'PaperPositionMode','Auto','PaperUnits','Inches','PaperSize',[pos(3), pos(4)]);

print(fig, 'V_vs_L','-dpdf','-r600');
print(fig, 'V_vs_L','-dpng','-r600');
savefig(fig, 'V_vs_L');

fig = figure('units','centimeters','outerposition',[0, 0, 0.8 * 21.0, 0.5 * 29.7]);

semilogx( ...
    L, ...
    I_Dsat_lin, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

hold on;
grid on;

semilogx( ...
    L, ...
    I_Dsat_n1, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

legend( ...
    'linear', ...
    'n = 1' ...
)

xlabel('$L$ ($\mathrm{cm}$)');
ylabel('$\{I_{\mathrm{D}}\}_{\mathrm{sat}}$ ($\mathrm{A}$)');

set(fig,'Units','Inches');
pos = get(fig,'Position');
set(fig,'PaperPositionMode','Auto','PaperUnits','Inches','PaperSize',[pos(3), pos(4)]);

print(fig, 'I_vs_L','-dpdf','-r600');
print(fig, 'I_vs_L','-dpng','-r600');
savefig(fig, 'I_vs_L');

```

ב. השפעת הקיבול
נתון :

$$N_A = 6 \cdot 10^{-19} [cm^{-3}]$$

$$\varphi_B = 0.33 [V]$$

הפרמטר M ניתן לחישוב מתוך הקבועים של הטרנזיסטור (הרצאה 3 משוואות 35-37)

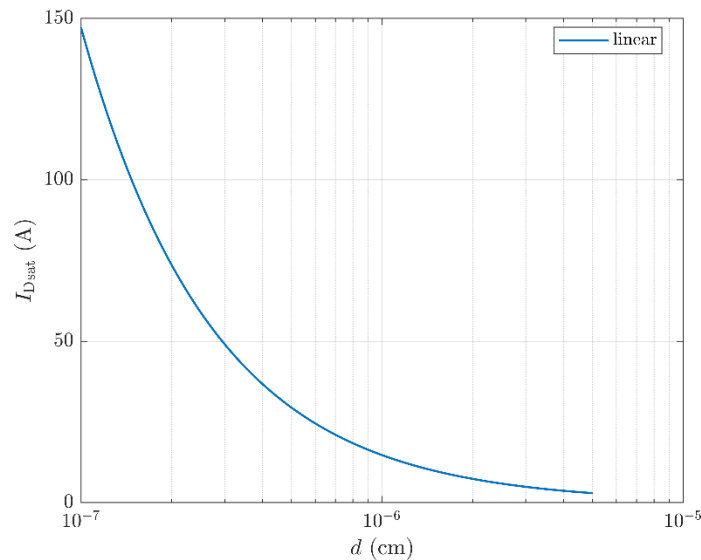
$$M = 1 + \frac{K}{2\sqrt{\phi_B}}$$

$$K = \sqrt{qN_A\epsilon_s/C_{ox}} \quad \text{כאשר:}$$

עבור $L = 5[\mu m]$ וקיבול משתנה

a. שרטט עקומת I_{Dsat} כתלות בעובי החומר הדיאלקטרי, על-פי המודל הלינארי למקוטעין. ערכי

עובי החומר הדיאלקטרי (d) שיש לקחת בחשבון הם מ $1 [nm]$ עד $50 [nm]$. הנח כי $\epsilon_i = 3.9$



מה ניתן להסיק על התלות בין עובי החומר הדיאלקטרי ו I_{Dsat} ?

אפשר לראות כי הגדלת עובי החומר הדיאלקטרי תוביל להקטנת זרם הרוויה של הטרנז'. זהו הקשר לו אנו מצפים

משום שעל פי הנוסחאות $C_{ox} \propto \frac{1}{d}$ ולכן מתקיים $I \propto C_{ox} \propto \frac{1}{d}$ ובפרט עבור זרם הרוויה זה מתקיים, אכן ניתן

לראות ירידה בזרם בצורה מקרובת של $\frac{1}{X}$ (ישנה תלות נוספת דרך ערכו של K אל היא מובחנת פחות). באופן

אינטואיטיבי ניתן לומר כי הגדלת d תקטין את הקיבול וזה יגרום להצטברות מטען היפוך קטן יותר בטרנז' אשר יאפשר הולכת זרם חלשה יותר.

הקוד :

```
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex');

set(groot, 'defaultLegendLocation', 'best')
set(groot, 'defaultLegendOrientation', 'vertical')

set(groot, 'defaultAxesFontSize', 12);

%%Tutorial 4%%

clear all;
clc

%%Constants

epsilon_0 = 8.854187e-10; % F/cm

%%Diode Parameters%%
V_G = 1; % [V]
V_T = 0.3; % [V]
N_A = 6e19 % [cm^-3]
```

```

psi_b = 0.33 %[V]
E_crit = 6.1e4; %[V/cm]
q = 1.6e-19
epsilon_r_ox = 3.9;

d = logspace(log10(1e-7), log10(50e-7), 100);
epsilon_s = epsilon_0 .* epsilon_r_ox;
c_ox = epsilon_s ./ d; %[F/cm^2]
K = sqrt( q .* N_A .* epsilon_s ) ./ c_ox;
M = 1 + K ./ (2 * sqrt( psi_b ));

mu_n = 1450; %[cm^2/Vs]

L = 5e-4; %[cm]
z = 12 * L; %[cm]

%%Linear approximation

V_Dsat_lin = L .* E_crit + (V_G - V_T) ./ M - sqrt((L .* E_crit) .^ 2 + ((V_G - V_T) ./ M) .^ 2); %[V]

I_Dsat_lin = (z .* mu_n .* c_ox ./ L) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_lin) .* V_Dsat_lin;
%[A]

%n=1
V_Dsat_n1 = L .* E_crit .* (sqrt(1 + 2 .* (V_G - V_T) ./ (M .* L .* E_crit)) - 1); %[V]
I_Dsat_n1 = (z .* mu_n .* c_ox .* E_crit ./ (L .* E_crit + V_Dsat_n1)) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_n1) .* V_Dsat_n1; %[A]

fig = figure('units','centimeters','outerposition',[0, 0, 0.8 * 21.0, 0.5 * 29.7]);

semilogx( ...
    d, ...
    I_Dsat_lin, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

hold on;
grid on;

legend( ...
    'linear' ...
)

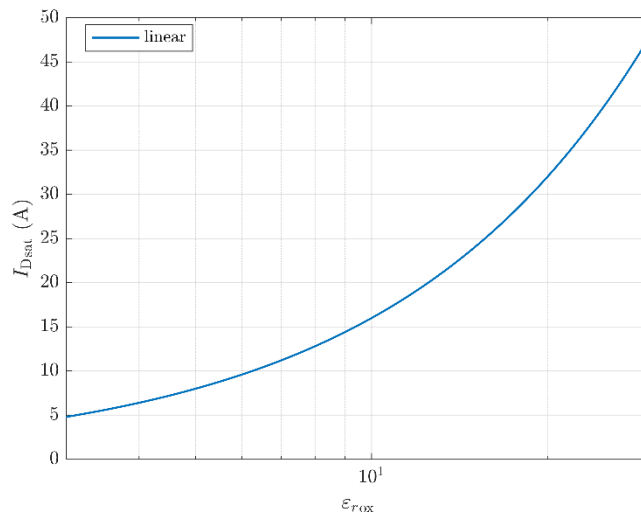
xlabel('$d$ ($\mathrm{cm}$)');
ylabel('$I_{D_{sat}}$ ($\mathrm{A}$)');

set(fig,'Units','Inches');
pos = get(fig,'Position');
set(fig,'PaperPositionMode','Auto','PaperUnits','Inches','PaperSize',[pos(3), pos(4)]);

print(fig, 'I_vs_d','-dpdf','-r600');
print(fig, 'I_vs_d','-dpng','-r600');
savefig(fig, 'I_vs_d');

```

b. שרטט עקומת I_{Dsat} כתלות במקדם הדיאלקטרי, על-פי המודל הלינארי למקוטעין. ערכי המקדם הדיאלקטרי (ϵ_i) שיש לקחת בחשבון הם מ-30 עד 10. הנח כי $d = 20[nm]$



מה ניתן להסיק על התלות בין המקדם הדיאלקטרי ו- I_{Dsat} ?

אפשר לראות כי הגדלת עובי החומר הדיאלקטרי תוביל להקטנת זרם הרווייה של הטרנזי. זהו הקשר לו אנו מצפים משום שעל פי הנוסחאות $C_{ox} \propto \epsilon$ ולכן מתקיים $I \propto C_{ox} \propto \epsilon$ ובפרט עבור זרם הרווייה זה מתקיים. בקומה למקרה הקודם, הגדלת המקדם, תגדיל את הקיבול, וזה יגרום להצטברות מטען היפוך גדול יותר בטרנזי. אשר יאפשר הולכת זרם חזקה יותר.

הקוד :

```
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex');

set(groot, 'defaultLegendLocation', 'best')
set(groot, 'defaultLegendOrientation', 'vertical')

set(groot, 'defaultAxesFontSize', 12);

%%Tutorial 4%%

clear all;
clc

%%Constants

epsilon_0 = 8.854187e-10; % F/cm

%%Diode Parameters%%
V_G = 1; % [V]
V_T = 0.3; % [V]
M = 10; % unitless
E_crit = 6.1e4; % [V/cm]
c_ox = 20e-9; % [F/cm^2]
epsilon_r_ox = logspace(log10(3), log10(30), 100);
d = 20e-7; % cm
c_ox = epsilon_0 .* epsilon_r_ox ./ d; % [F/cm^2]
mu_n = 1450; % [cm^2/Vs]

L = 5e-4; % [cm]
z = 12 * L; % [cm]

%%Linear approximation
```

```

V_Dsat_lin = L .* E_crit + (V_G - V_T) ./ M - sqrt((L .* E_crit) .^ 2 + ((V_G - V_T) ./ M) .^ 2); %[V]

I_Dsat_lin = (z .* mu_n .* c_ox ./ L) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_lin) .* V_Dsat_lin;
%[A]

%n=1

V_Dsat_n1 = L .* E_crit .* (sqrt(1 + 2 .* (V_G - V_T) ./ (M .* L .* E_crit)) - 1); %[V]

I_Dsat_n1 = (z .* mu_n .* c_ox .* E_crit ./ (L .* E_crit + V_Dsat_n1)) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_n1) .* V_Dsat_n1; %[A]

fig = figure('units','centimeters','outerposition',[0, 0, 0.8 * 21.0, 0.5 * 29.7]);

semilogx( ...
    epsilon_r_ox, ...
    I_Dsat_lin, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

hold on;
grid on;

legend( ...
    'linear' ...
)

xlabel('${\varepsilon_r}_{\mathrm{ox}}$');
ylabel('${I_{\mathrm{D}}}_{\mathrm{sat}}$ ($\mathrm{A}$)');

set(fig,'Units','Inches');
pos = get(fig,'Position');
set(fig,'PaperPositionMode','Auto','PaperUnits','Inches','PaperSize',[pos(3), pos(4)]);

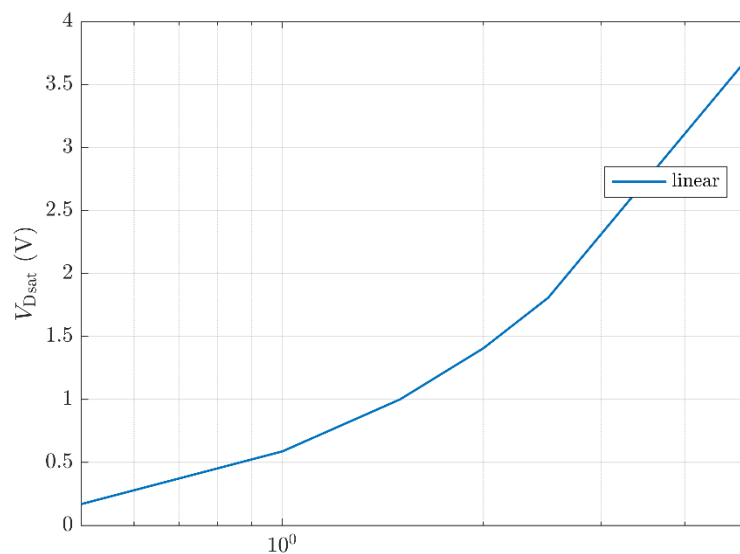
print(fig, 'I_vs_epsilon_r_ox','-dpdf','-r600');
print(fig, 'I_vs_epsilon_r_ox','-dpng','-r600');
savefig(fig, 'I_vs_epsilon_r_ox');

```

ג. השפעת מתח השער

$$C_{ox} = 20 \frac{nF}{cm^2} \text{ ו- } L = 5[\mu m]$$

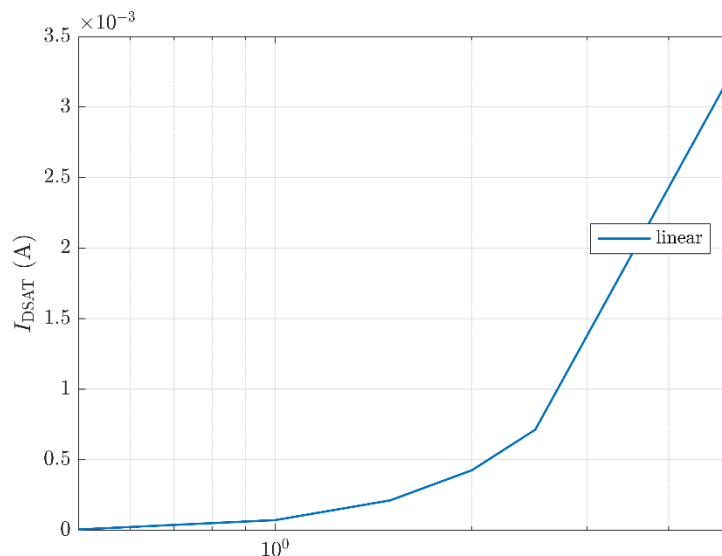
a. שרטט עקומת V_{Dsat} כתלות ב- V_G על-פי המודל הלינארי למקוטעין. ערכי V_G שיש לקחת בחשבון הם מ- $0.5 V$ ל- $5 V$



מה ניתן להסיק על התלות בין V_G ו- V_{Dsat} ?

אפשר לראות במקרה הזה הגדלת הערך של $V_G - V_T$ (ששוקל להגדלת V_G) תגרום להגדלת מתח הרוויה. בגלל ש $V_{Dsat} \propto (V_G - V_T)$ ולכן נצפה לקשר לינארי, כאשר בנוסחה המלאה ישנו ביטוי נוסף אשר משנה במעט את התלות כולה, אולם שומר על קורלציה זהה. אנו מצפים לכך שכן הגדלת V_G תוביל להגדלת מטען ההיפוך המצטבר, לכן ישנו צורך בהפעלת מתח V_D גדול יותר, על מנת להביא את נושאי המטען החופשיים לרוויה. וזה מה שאנחנו מקביל, מתח הרוויה עולה עם העליה במתח השער.

b. שרטט עקומת I_{Dsat} כתלות ב- V_G על-פי המודל הלינארי למקוטעין. ערכי V_G שיש לקחת בחשבון הם מ-0.5 V ל-5 V
מה ניתן להסיק על התלות בין V_G ו- I_{Dsat} ?



באופן דומה אנו אוריס כי הגדלת מתח V_G תגרום להגדלת זרם הרוויה בטרנז'י. אנו רואים כי האיבר המוביל בנוסחה הוא מהצורה $I \propto (V_G - V_T) * V_{Dsat}$ ולכן אם הקשר למתח הרוויה היה לינארי בקירוב, אז במקרה זה נקבל כי הקשר פרבולי בקרוב. גם במקרה זה קיימת אותה אינטואיציה לגבי הצטברות של יותר נושאי מטען חופשיים בתעלה בעקבות הגדלת המתח V_G , והיא זו שתוביל למסקנה כי יותר נ"מ יגרמו לזרם גדול יותר, ולכן זרם הרוויה עולה עם העליה במתח השער

הקוד לשני הסעיפים :

```
set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');
set(groot, 'defaultTextInterpreter', 'latex');

set(groot, 'defaultLegendLocation', 'best')
set(groot, 'defaultLegendOrientation', 'vertical')

set(groot, 'defaultAxesFontSize', 12);

%%Tutorial 4%%

clear all;
clc

%%Constants

epsilon_0 = 8.854187e-10; % F/cm

%%Diode Parameters%%
% V_G = 1; %[V]
V_G = logspace(log10(0.5), log10(5), 100); %[V]
V_T = 0.3; %[V]
M = 1.18; %unitless
```

```

E_crit = 6.1e4; %[V/cm]
c_ox = 20e-9; %[F/cm^2]
mu_n = 1450; %[cm^2/Vs]

L = 5e-4; %[cm]
z = 12 * L; %[cm]

%%Linear approximation

V_Dsat_lin = L .* E_crit + (V_G - V_T) ./ M - sqrt((L .* E_crit) .^ 2 + ((V_G - V_T) ./ M) .^ 2); %[V]

I_Dsat_lin = (z .* mu_n .* c_ox ./ L) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_lin) .* V_Dsat_lin;
%[A]

%%n=1

V_Dsat_n1 = L .* E_crit .* (sqrt(1 + 2 .* (V_G - V_T) ./ (M .* L .* E_crit)) - 1); %[V]

I_Dsat_n1 = (z .* mu_n .* c_ox .* E_crit ./ (L .* E_crit + V_Dsat_n1)) .* (V_G - V_T - 0.5 .* M .* V_Dsat_n1) .* V_Dsat_n1; %[A]

fig = figure('units','centimeters','outerposition',[0, 0, 0.8 * 21.0, 0.5 * 29.7]);

semilogx( ...
    V_G, ...
    V_Dsat_lin, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

hold on;
grid on;

legend( ...
    'linear' ...
)

xlabel('$V_{\mathrm{G}}$');
ylabel('$V_{\mathrm{D}}_{\mathrm{sat}}$ ($\mathrm{V}$)');

set(fig,'Units','Inches');
pos = get(fig,'Position');
set(fig,'PaperPositionMode','Auto','PaperUnits','Inches','PaperSize',[pos(3), pos(4)]);

print(fig, 'V_Dsat_lin_vs_V_G','-dpdf','-r600');
print(fig, 'V_Dsat_lin_vs_V_G','-dpng','-r600');
savefig(fig, 'V_Dsat_lin_vs_V_G');

fig = figure('units','centimeters','outerposition',[0, 0, 0.8 * 21.0, 0.5 * 29.7]);

semilogx( ...
    V_G, ...
    I_Dsat_lin, ...
    'LineWidth', 1.25 ...
)

hold on;
grid on;

legend( ...
    'linear' ...
)

xlabel('$V_{\mathrm{G}}$');
ylabel('$I_{\mathrm{DSAT}}$ ($\mathrm{A}$)');

set(fig,'Units','Inches');
pos = get(fig,'Position');
set(fig,'PaperPositionMode','Auto','PaperUnits','Inches','PaperSize',[pos(3), pos(4)]);

print(fig, 'I_Dsat_lin_vs_V_G','-dpdf','-r600');
print(fig, 'I_Dsat_lin_vs_V_G','-dpng','-r600');
savefig(fig, 'I_Dsat_lin_vs_V_G');

```

שאלה 2-MOSFET V_t :

תעלה מסוג N-MOSFET עם שער N+-poly, תוכננה על מצע סילקון P-type $15 \Omega \text{ cm}$, עם צפיפות מטען של $q \times 8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ התחמוצת

ונתון:

$$W = 50 \mu\text{m}, L = 2 \mu\text{m}, T_{ox} = 5 \text{ nm}.$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{15} [\text{cm}^{-3}]$$

$$\phi_{PS} \approx 4.05 [\text{V}]$$

$$\phi_{PS} - \phi_s = -0.89 [\text{V}]$$

1. חשב את V_{fb}

2. מה הוא מתח הסף V_t

3. מהנדס התקנים התבקש לתכנן טרנזיסטור N-MOSFET עם $V_t = 0.5 \text{ V}$ כך שלא ניתן לשנות את עובי תחמוצת השער. איזה פתרונות המהנדס יכול להציע? הצע שתי דרכים לענות על הדרישה ההנדסית ופרט כיצד ניתן לבצען (באילו מערכות ותהליכים יש להשתמש לשם כך).

פתרון שאלה 2:

$$V_{FB} = (\Phi_{PS} - \Phi_s) - \frac{Q_{fixed}}{C_{ox}} \quad 1.$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_s \epsilon_o}{d_{ox}} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}}{5 \cdot 10^{-7}} = 6.9 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{F}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$V_{FB} = -8.9 - \frac{q \cdot 8 \cdot 10^{10}}{6.9 \cdot 10^{-7}} = 0.89 - \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{10}}{6.9 \cdot 10^{-7}} = -0.9 [\text{V}]$$

2. מתח הסף

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b)}{C_{ox}}$$

$$Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b) = -\sqrt{2qN_A K_s \epsilon_s 2\phi_b} = -\sqrt{4 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{15} \cdot 11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \cdot 0.33} = -3.064 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{C}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$V_t = -0.9 + 0.66 + \frac{3.064 \cdot 10^{-8}}{6.9 \cdot 10^{-7}} \approx -0.196 [\text{V}]$$

3.

There are two ways to vary the V_t of an NMOS transistor, without changing the oxide thickness:

- By varying substrate doping concentration.
- By varying source to body voltage.

In the ion implantation charged dopants (ions) are accelerated in an electric field and irradiated onto the wafer. The penetration depth can be set very precisely by reducing or increasing the voltage needed to accelerate the ions. Since the process takes place at room temperature,

previously added dopants cannot diffuse out. Regions that should not be doped, can be covered with a masking photoresist layer.

An implanter consists of the following components:

ion source: the dopants in gaseous state (e.g. boron trifluoride BF_3) are ionized

accelerator: the ions are drawn with approximately 30 kiloelectron volts out of the ion source

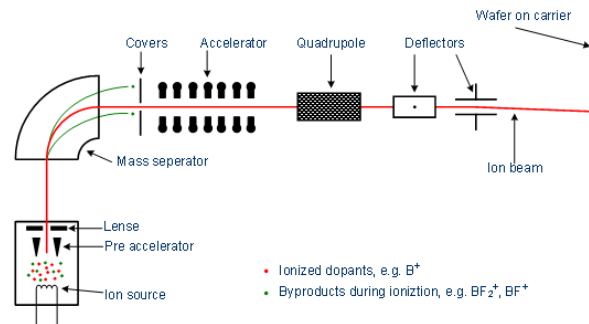
mass separation: the charged particles are deflected by a magnetic field by 90 degrees. Too light/heavy particles are deflected more/less than the desired ions and trapped with screens behind the separator

acceleration lane: several 100 keV accelerate the particles to their final velocity (200 keV accelerate bor ions up to 2.000.000 m/s)

Lenses: lenses are distributed inside the entire system to focus the ion beam

deflection: the ions are deflected with electrical fields to irradiate the desired location

wafer station: the wafers are placed on large rotating wheels and held into the ion beam



as for the quantitative calculations, we will look at the Delta charge, shallow dopant profile,

$$N_i \left[\frac{\#}{\text{cm}^2} \right]$$

$$V_t = \Phi_{MS} + 2\phi_b + \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s 2\phi_b}}{C_{ox}} + \frac{qN_i}{C_{ox}}$$

Where $\Phi_{MS} + 2\phi_b + \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s 2\phi_b}}{C_{ox}}$ is the V_t we found above.

Reaching a $V_t = 0.5[V]$ means that our change in $\Delta V_t = V_{tdemand} - V_{tobtained} = 0.5 - 0.196 = 0.696[V]$

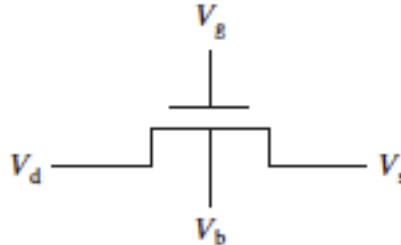
Therefore.

$$\frac{qN_i}{C_{ox}} = \Delta V_t = 0.696[V]$$

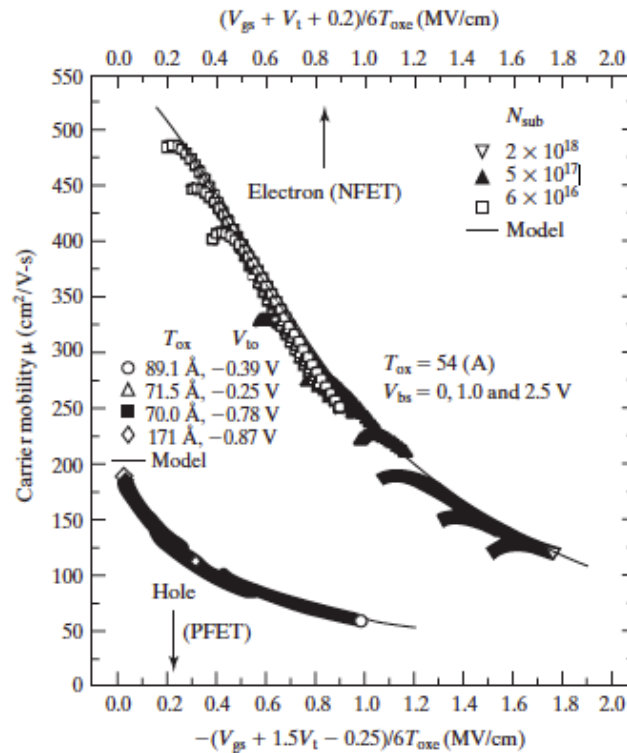
$$N_i = \frac{C_{ox}\Delta V_t}{q} = \frac{6.9 \cdot 10^{-7} \cdot 0.696}{1.6 \cdot 10^{-19}} = 2.99 \cdot 10^{12} \left[\frac{1}{\text{cm}^2} \right]$$

שאלה 3-מתח סף COMS

נתונים N-MOSFET ו P-MOSFET עם מצע בעל ריכוז סימום של $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (P-type עבור מצע N-MOSFET ו N-type עבור מצע P-MOSFET)
 עובי שכבת התחמוצת של השער היא 5 nm.
 $\phi_{PS} \approx 4.05[V]$



1. מצע את V_t עבור N-MOSFET כאשר משתמשים ב N^+ poly-Si לתכנון אלקטרודת השער.
2. מצע את V_t עבור P-MOSFET כאשר משתמשים ב N^+ poly-Si לתכנון אלקטרודת השער.
3. מצע את V_t עבור P-MOSFET כאשר משתמשים ב P^+ poly-Si לתכנון אלקטרודת השער.
4. נניח ששני המתחים היחידים שקיימים בשבב הם מתח drain שהוא $V_{dd} = 2.5 \text{ V}$, וההארקה 0V, אילו מתח יש להחיל על כל אחד מהטרמינלים V_g, V_s, V_b , כדי לקבל זרם I_{SD} מינימלי בטרנזיסטור N-MOSFET? (כאשר V_d שווה ל 2.5 וולט)
5. נניח ששני המתחים היחידים שקיימים בשבב הם מתח source שהוא $V_s = 2.5 \text{ V}$, וההארקה 0V, אילו מתח יש להחיל על כל אחד מהטרמינלים V_g, V_d, V_b , כדי לקבל זרם I_{SD} מקסימלי בטרנזיסטור P-MOSFET? (כאשר V_s שווה ל 2.5 וולט)
6. למי מבין שני הטרנזיסטורים (2) או (3) יש את זרם הרוויה הגדול יותר?
 בהנחה שמתח האספקה הוא 2.5 וולט, מצא את היחס בין זרם הרוויה של טרנזיסטור (2) לזה של טרנזיסטור (3).
7. מה היחס בין זרם הרוויה של טרנזיסטור (3) לזה של טרנזיסטור (1)?
 השתמש בערכי הניידות באיור 2.



איור 2: המוביליות האפקטיבית של אלקטרונים וחורים בתוך שכבת היפוך כתלות בגודל השדה הניצב עבור ריכוזי מזהמים שונים.

פתרון שאלה 3-מתח סף COMS

1. מצע את V_t עבור N-MOSFET כאשר משתמשים ב N^+ poly-Si לתכנון אלקטרודת השער.

NMOS $\rightarrow$ P-type substrate.

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b)}{C_{ox}}$$

$$V_{FB} = (\Phi_{PS} - \Phi_s) - \frac{Q_{fixed}}{C_{ox}} \rightarrow V_{FB} = (\Phi_{PS} - \Phi_s)$$

$$\Phi_s = \chi_{si} + (E_c - E_F) = \chi_{si} + \frac{E_g}{2q} + \phi_b$$

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.026 \cdot \ln\left(\frac{3 \cdot 10^{16}}{1.5 \cdot 10^{10}}\right) \approx 0.377[V]$$

$$V_{FB} = 4.05 - 4.05 - 0.56 - 0.377 = -0.937[V]$$

$$Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b) = -\sqrt{2qN_AK_s\epsilon_s 2\phi_b} = -\sqrt{4 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{16} \cdot 11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \cdot 0.377} = -8.7 \cdot 10^{-8} \left[\frac{C}{cm^2}\right]$$

$$C_{ox} = \frac{K_s\epsilon_0}{d_{ox}} = \frac{3.9 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14}}{5 \cdot 10^{-7}} = 6.9 \cdot 10^{-7} \left[\frac{F}{cm^2}\right]$$

$$V_t = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b)}{C_{ox}} = -0.937 + 0.754 + \frac{8.7 \cdot 10^{-8}}{6.9 \cdot 10^{-7}} \rightarrow V_t = -0.057[V]$$

2. מצע את V_t עבור P-MOSFET כאשר משתמשים ב N^+ poly-Si לתכנון אלקטרודת השער.

$$V_t = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b)}{C_{ox}}$$

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.026 \cdot \ln\left(\frac{3 \cdot 10^{16}}{1.5 \cdot 10^{10}}\right) \approx 0.377[V]$$

$$V_{FB} = (\Phi_{PS} - \Phi_s) = \chi_{si} - \left[\chi_{si} + \frac{E_g}{2q} + \phi_b\right] = -0.56 + 0.377 = -0.187[V]$$

$$C_{ox} = \frac{K_s \epsilon_0}{d_{ox}} = 6.9 \cdot 10^{-7} \left[\frac{F}{cm^2}\right]$$

$$Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b) = -\sqrt{2qN_A K_s \epsilon_s 2\phi_b} =$$

$$-\sqrt{4 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{16} \cdot 11.8 \cdot 8.85 \cdot 10^{-14} \cdot 0.377} = -8.7 \cdot 10^{-8} \left[\frac{C}{cm^2}\right]$$

$$V_t = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b)}{C_{ox}} = -0.187 + 0.754 + \frac{8.7 \cdot 10^{-8}}{6.9 \cdot 10^{-7}} \rightarrow V_t = -1.067[V]$$

3. מצע את V_t עבור P-MOSFET כאשר משתמשים ב P^+ poly-Si לתכנון אלקטרודת השער.

PMOS $\rightarrow$ N-type substrate.

$$V_t = V_{FB} + 2\phi_b - \frac{Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b)}{C_{ox}}$$

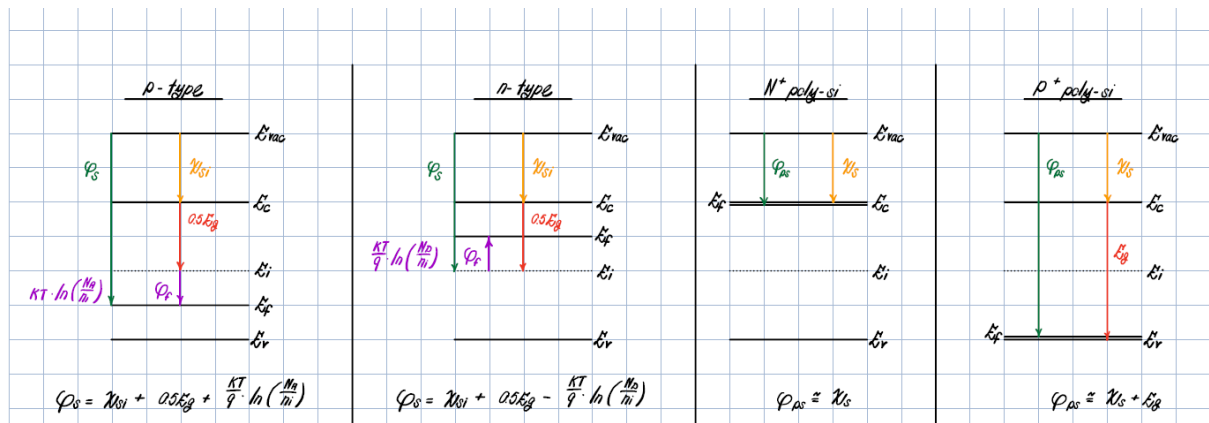
$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) = 0.026 \cdot \ln\left(\frac{3 \cdot 10^{16}}{1.5 \cdot 10^{10}}\right) \approx 0.377[V]$$

$$V_{FB} = (\Phi_{PS} - \Phi_s) = \chi_{si} - \left[\chi_{si} + \frac{E_g}{2q} + \phi_b\right] = -0.937[V]$$

$$C_{ox} = \frac{K_s \epsilon_0}{d_{ox}} = 6.9 \cdot 10^{-7} \left[\frac{F}{cm^2}\right]$$

$$Q_{dep}(\phi_s = 2\phi_b) = 8.7 \cdot 10^{-8} \left[\frac{C}{cm^2}\right]$$

$$V_t = -0.937 + 0.754 + \frac{8.7 \cdot 10^{-8}}{6.9 \cdot 10^{-7}} \rightarrow V_t = -0.0543[V]$$

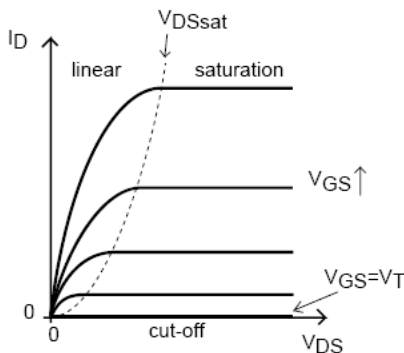


לכן נקבל ש: $V_t(N^+, PMOS) < V_t(N^+, NMOS) < 0 < V_t(P^+, NMOS)$

4. נניח ששני המתחים היחידים שקיימים בשבב הם מתח drain שהוא $V_{dd} = 2.5\text{ V}$, וההארקה 0 V , אילו מתח יש להחיל על כל אחד מהטרמינלים V_G, V_S, V_B , כדי לקבל זרם I_{SD} מינימלי בטרנזיסטור N-MOSFET (כאשר V_d שווה ל 2.5 וולט)

זרם מינימלי יתקבל כאשר הטרנזיסטור בקטעון והזרם שיזרום יהיה זרם זליגה התנאי לקטעון - $V_{gs} < V_t$, כאשר עבור NMOS שבו $V_{FB} > 0$ ולכן נדרש $V_{gs} = V_g = V_s = 0$, וכדי לקבל שזה בתחום תת סף נדרש גם, $V_b = 0$ ובשביל למנוע אפקטי מצע $V_b = V_g = V_s = 0$

5. נניח ששני המתחים היחידים שקיימים בשבב הם מתח source שהוא $V_s = 2.5\text{ V}$, וההארקה 0 V , אילו מתח יש להחיל על כל אחד מהטרמינלים V_G, V_d, V_b , כדי לקבל זרם I_{SD} מקסימלי בטרנזיסטור P-MOSFET (כאשר V_s שווה ל 2.5 וולט)



כדי להגיע לזרם רוויה מקסימלי ב PMOS ראשית נבחר מתח V_{SD} מקסימלי. כלומר $V_{gs} - V_t > V_{DS}$, $V_{gs} > V_t$ נתון ש $V_s = 2.5\text{ V}$ ובגלל זה נגדיר את $V_D = 0$. הביטוי לזרם הרוויה פרופורציונאלי ל V_{SG} . נרצה לבחור במתח V_G כך ש $V_{SG} = 0$ בגלל זה יהיה מקסימלי, בנוסף, כדי להימנע מאפקטים מצע, נרצה ש V_{BS} יהיה שווה לאפס, ובגלל זה נבחר ב V_B בממתח זהה לזה של V_s , ולכן $V_B = 2.5\text{ V}$

6. למי מבין שני הטרנזיסטורים (2) או (3) יש את זרם הרוויה הגדול יותר? בהנחה שמתח האספקה הוא 2.5 וולט, מצא את היחס בין זרם הרוויה של טרנזיסטור (2) לזה של טרנזיסטור (3).

(2) is a PMOSFET with N^+ poly gate, and $V_t = -1.067\text{ [V]}$

(3) is a PMOSFET with P^+ poly gate, and $V_t = 0.056\text{ [V]}$

$$I_{SD} = \frac{w}{L} \mu_n C_{ox} \frac{1}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

נחבין לפי הקשר הזה כי ככל ש V_T יותר גדול עבור V_{GS} יותר גדול נקבל זרם רוויה יותר גדול ולכן נקבל כי עבור הטרנזיסטור מסעיף (2) יהיה זרם רוויה יותר גדול, ונחשב את היחס לפי :

$$\text{The ratio would be } \frac{I_{SD3}}{I_{SD2}} = \frac{(-2.5-0.057)^2}{(2.5+1.067)^2} \approx 3.18$$

7. מה היחס בין זרם הרוויה של טרנזיסטור (3) לזה של טרנזיסטור (1)?
השתמש בערכי הניידות באיור 2.

is a NMOSFET with N^+ poly gate, and

$$V_t = -0.057[V]$$

While mobility for holes and electrons is different:

$$\mu_n \approx 350 \frac{cm^2}{Vs}$$

$$\mu_p \approx 65 \frac{cm^2}{Vs}$$

$$\text{The ratio } \frac{I_{SDc}}{I_{SDa}} = \frac{I_3}{I_1} = \frac{\mu_3(V_{GS3} - V_{t3})^2}{\mu_1(V_{GS1} - V_{t1})^2} = \frac{65(-2.5 - 0.057)^2}{350(2.5 + 0.057)^2} \approx$$

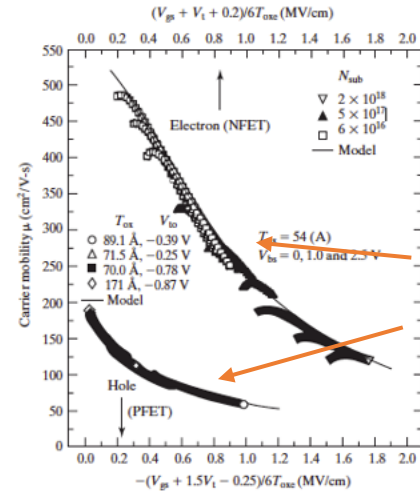


FIGURE 6-9 Electron and hole surface mobilities are determined by V_{gs} , V_t , and T_{oxe} . T_{oxe} is the SiO₂ equivalent electrical oxide thickness. (From [4]. © 1996 IEEE.)