

2015年3月2日

高耐圧MOSFET特性 (ドリフト層解析)

群馬大学
松田順一

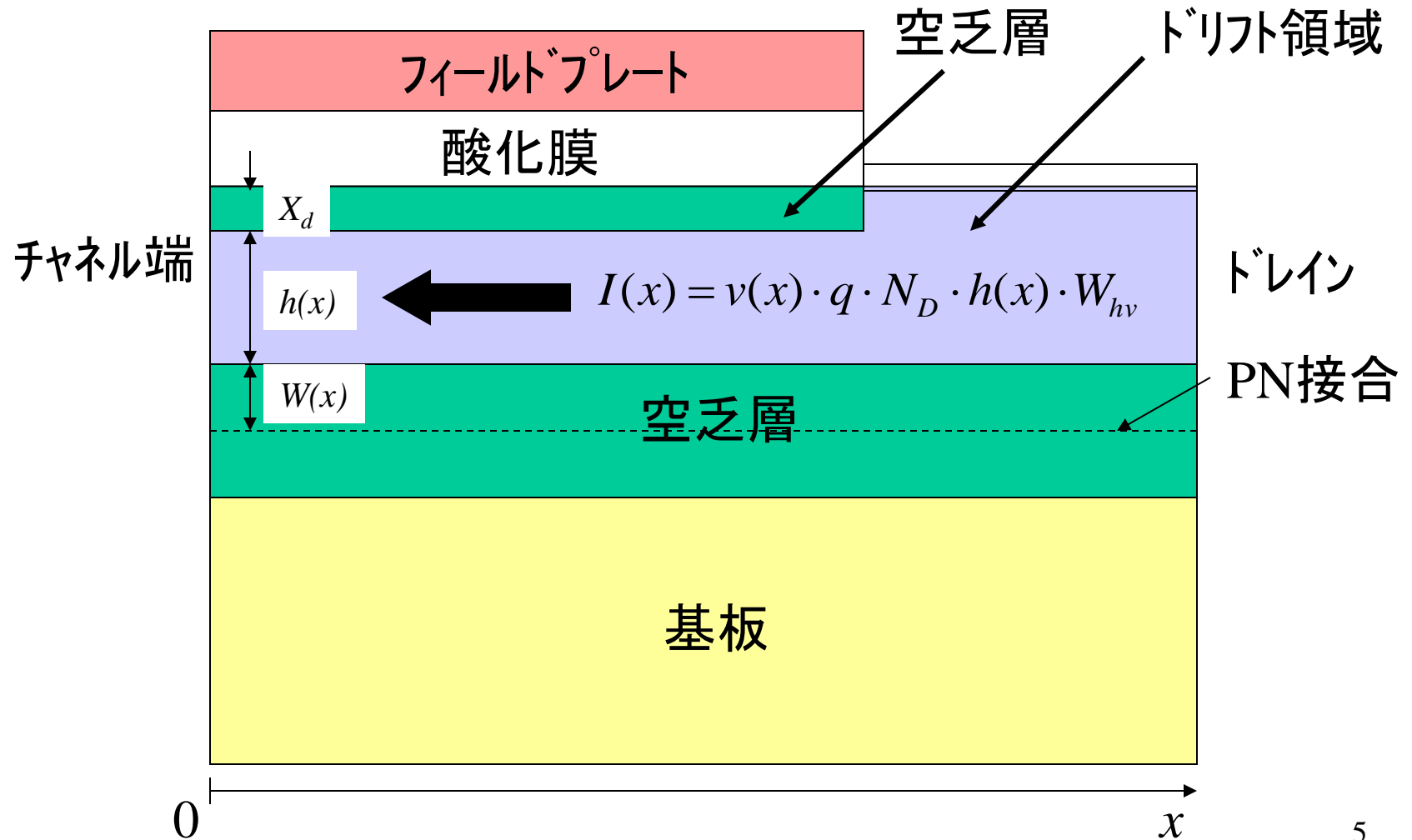
概要

- ドリフト層解析
- ソース抵抗 R_S とドレイン抵抗 R_D の抽出

(注)群馬大学アナログ集積回路研究会 第45回講演会(2006年7月21日)の資料から抜粋

高耐圧MOSFET —ドリフト層の解析—

ドリフト領域の電流



ドリフト領域の電流

フィールドプレートによる空乏層とドレイン接合による空乏層の間を流れる x における電流 $I(x)$ は、以下となる。

$$I(x) = v(x) \cdot Q(x) \cdot W_{hv} = v(x) \cdot q \cdot N_D \cdot h(x) \cdot W_{hv}$$

$v(x)$ はキャリア速度

N_D はn-Wellのドーピング密度

W_{hv} はデバイスの幅

$h(x)$ は電流の通過領域の高さ

$$h(x) = X_j - W(x) - X_d(x)$$

X_j はn-Wellの接合深さ

$W(x)$ はドレイン接合による空乏層幅

$X_d(x)$ はフィールドプレートによる空乏層幅

フィールドプレートによる空乏層幅 X_d の導出(1)

ドレイン電圧 V_d により、例えば $V_g \geq 0$ でもフィールドプレート下が空乏化しているとする ($V_g < V_d$)、表面電界 E_s と表面電位 ϕ_s は、以下で表される。

$$E_s = -\frac{qN_D X_d}{\epsilon_s}, \quad \phi_s = -\frac{qN_D X_d^2}{2\epsilon_s}$$

また、**Si-SiO₂**界面に電荷がないものとする、

$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s$$

となり、フィールド酸化膜にかかる電圧 V_{ox} は、酸化膜中に電荷がない場合、以下になる。

$$V_{ox} = E_{ox} t_{ox} = -\frac{qN_D X_d t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

フィールドプレートによる空乏層幅 X_d の導出(2)

x における電位を $V(x)$ とすると、フィールドプレートに印加されている電圧 V_g は、以下に分割される。

$$V_g - V_{FB} = V_g' = V_{ox} + \varphi_s + V(x)$$

V_{FB} はフラットバンド電圧

先に求めた V_{ox} と φ_s を V_g' の式に代入すると、

$$V(x) - V_g' = \frac{qN_D X_d t_{ox}}{\epsilon_{ox}} + \frac{qN_D X_d^2}{2\epsilon_s}$$

を得る。上式から X_d は以下で表される。

$$X_d = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox}\right)^2 + \frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V(x) - V_g') - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox}}$$

電荷通過領域高さ $h(x)$ の導出

$W(x)$ は、ステップ接合の空乏層を仮定すると以下となる。

$$W(x) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s N_A V(x)}{qN_D(N_D + N_A)}}$$

これから、 $h(x)$ は以下となる。

$$h(x) = \left(X_j + \frac{\varepsilon_s t_{ox}}{\varepsilon_{ox}} \right) - R_b \sqrt{V(x)} - R_{fp} \sqrt{A + V(x) - V_g'}$$

$$R_b = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s N_A}{qN_D(N_D + N_A)}}$$

$$R_{fp} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_D}}$$

$$A = \frac{q\varepsilon_s N_D}{2} \left(\frac{t_{ox}}{\varepsilon_{ox}} \right)^2$$

電流電圧特性1

電子と正孔の速度と電界の関係は、以下で表される。

$$v(x) = \frac{v_{sat} E_x}{E_{sat} + E_x}, \quad v_{sat} (= \mu E_{sat}) \quad : \text{キャリアの速度飽和}$$

電流方向の電界は、 $E_x = dV/dx$ であるから、電流 $I(x)$ は

$$I(x) = qN_D v_{sat} W_{hv} \frac{dV}{E_{sat} dx + dV} \cdot \left[\left(X_j + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \right) - R_b \sqrt{V(x)} - R_{fp} \sqrt{A + V(x) - V_g'} \right]$$

となる。 $I_{sat} = qN_D v_{sat} W_{hv}$ とし、上式を $V(x=0) = V_{d1}$ から $V(x=L_g) = V_{d2}$ まで積分すると、電流 I_{fp} は以下の如くなる。

$$I_{fp} = \frac{I_{sat}}{E_{sat} L_g + V_{d2} - V_{d1}} \left\{ \left(X_j + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \right) (V_{d2} - V_{d1}) - \frac{2}{3} R_b (V_{d2}^{3/2} - V_{d1}^{3/2}) - \frac{2}{3} R_{fp} \left[(A + V_{d2} - V_g')^{3/2} - (A + V_{d1} - V_g')^{3/2} \right] \right\}$$

電流電圧特性2

フィールドプレート端とドレインコンタクト間の電流 I_{ld} は、 $I(x)$ の式を $V(x = L_g) = V_{d2}$ から $V(x = L_{dd}) = V_d$ の間で積分すると、

$$I_{ld} = \frac{I_{sat}}{E_{sat}L_d + V_d - V_{d2}} \left[X_j(V_d - V_{d2}) - \frac{2}{3}R_b(V_d^{3/2} - V_{d2}^{3/2}) \right]$$

となる。 $(X_d = 0)$ で近似

キャリアの速度飽和の開始は $E_x = E_{sat}$ で起こる。

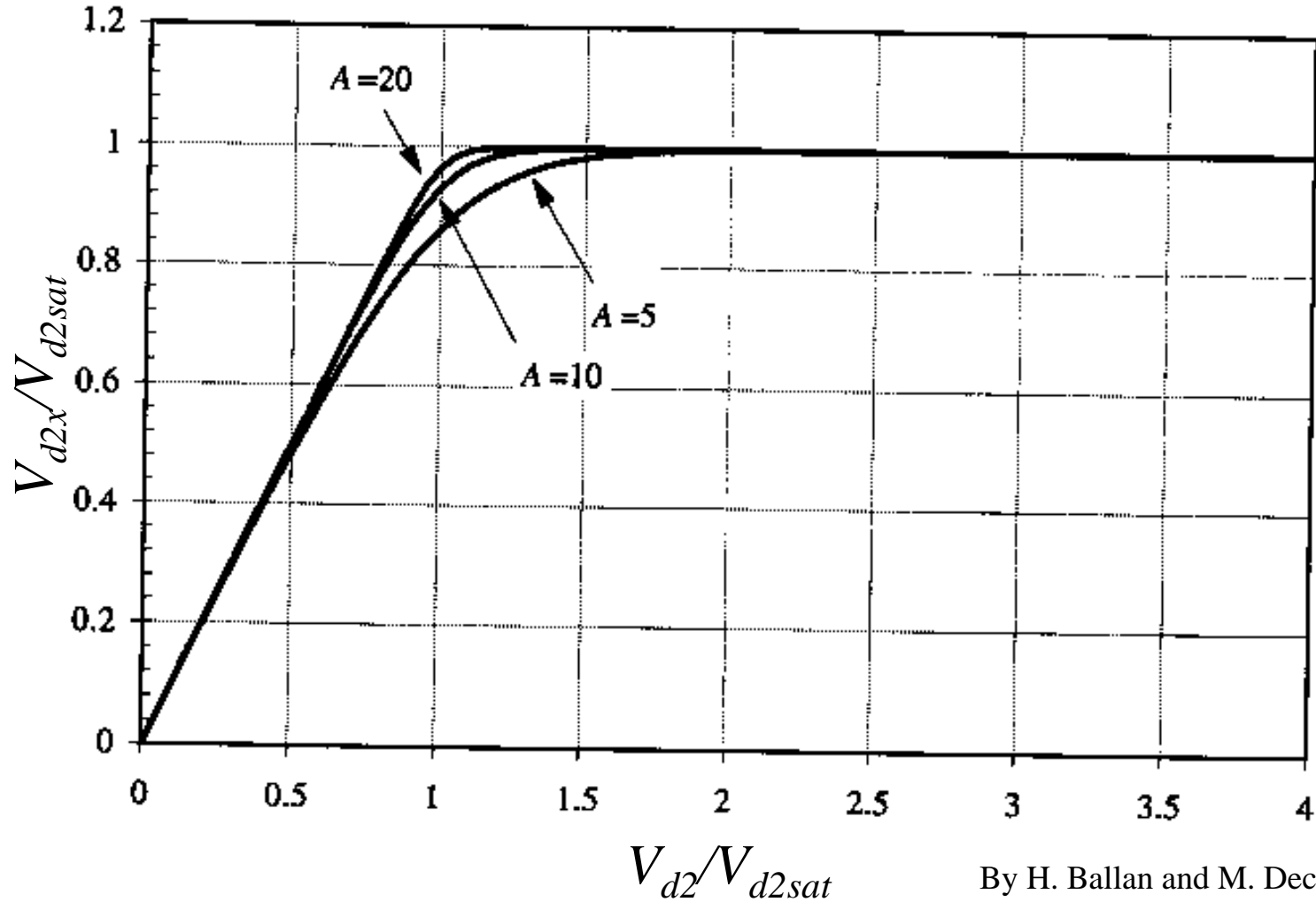
⇒ h は有限の値 h_{sat} を持つ。 $(h_{sat}$ での V_{d2} が飽和電圧 V_{d2sat})

この場合、線型領域から飽和領域へ変る点で電流 - 電圧特性に不連続が発生する。これを避けるために V_{d2} に以下の V_{d2x} を用いる。

$$V_{d2x} = V_{d2sat} \left\{ 1 - \frac{\ln[1 + e^{A(1 - V_{d2}/V_{d2sat})}]}{\ln(1 + e^A)} \right\}$$

ここで、 A は変化点でシャープさを表すパラメータである。 11

線型から飽和領域へのトランジション関数



By H. Ballan and M. Declercq

全領域（線型と飽和）の電流電圧特性

V_{d2} に V_{d2x} を代入した I_{fp} は、線型から飽和領域まで表される。

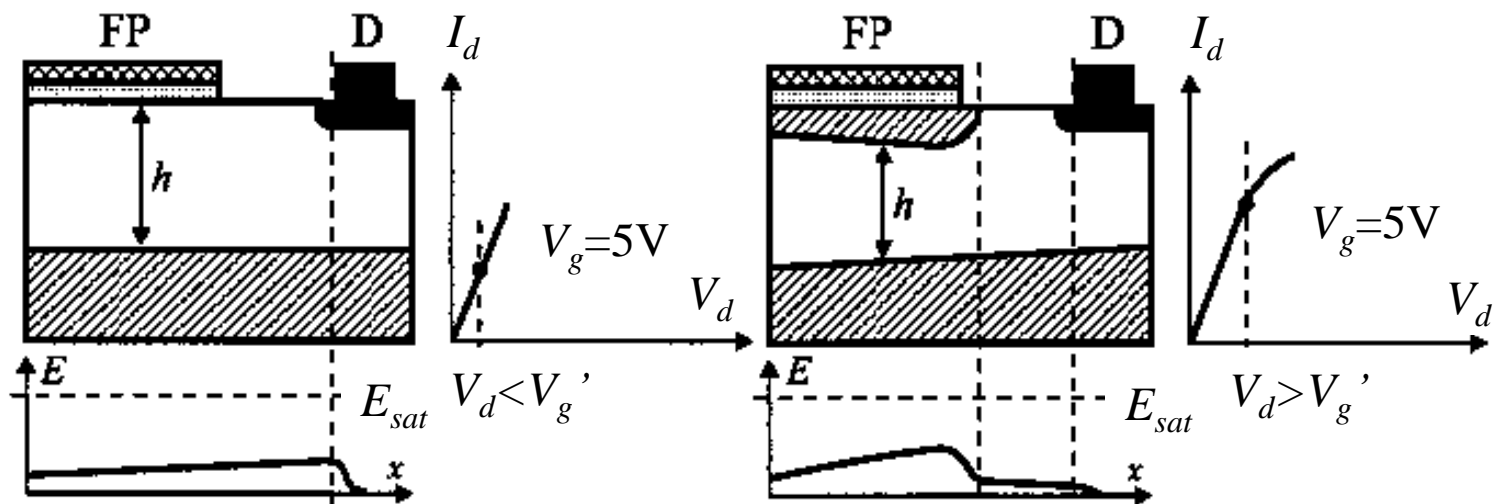
$$I_{fp} = \frac{I_{sat}}{E_{sat}L_g + V_{d2x} - V_{d1}} \left\{ \left(X_j + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \right) (V_{d2x} - V_{d1}) - \frac{2}{3} R_b (V_{d2x}^{3/2} - V_{d1}^{3/2}) - \frac{2}{3} R_{fp} \left[(A + V_{d2x} - V_g')^{3/2} - (A + V_{d1} - V_g')^{3/2} \right] \right\}$$

また、同様に $I_{ld'}$ の場合は、以下となる。

$$I_{ld'} = \frac{I_{sat}}{E_{sat}L_d + V_d - V_{d2x}} \left[X_j (V_d - V_{d2x}) - \frac{2}{3} R_b (V_d^{3/2} - V_{d2x}^{3/2}) \right]$$

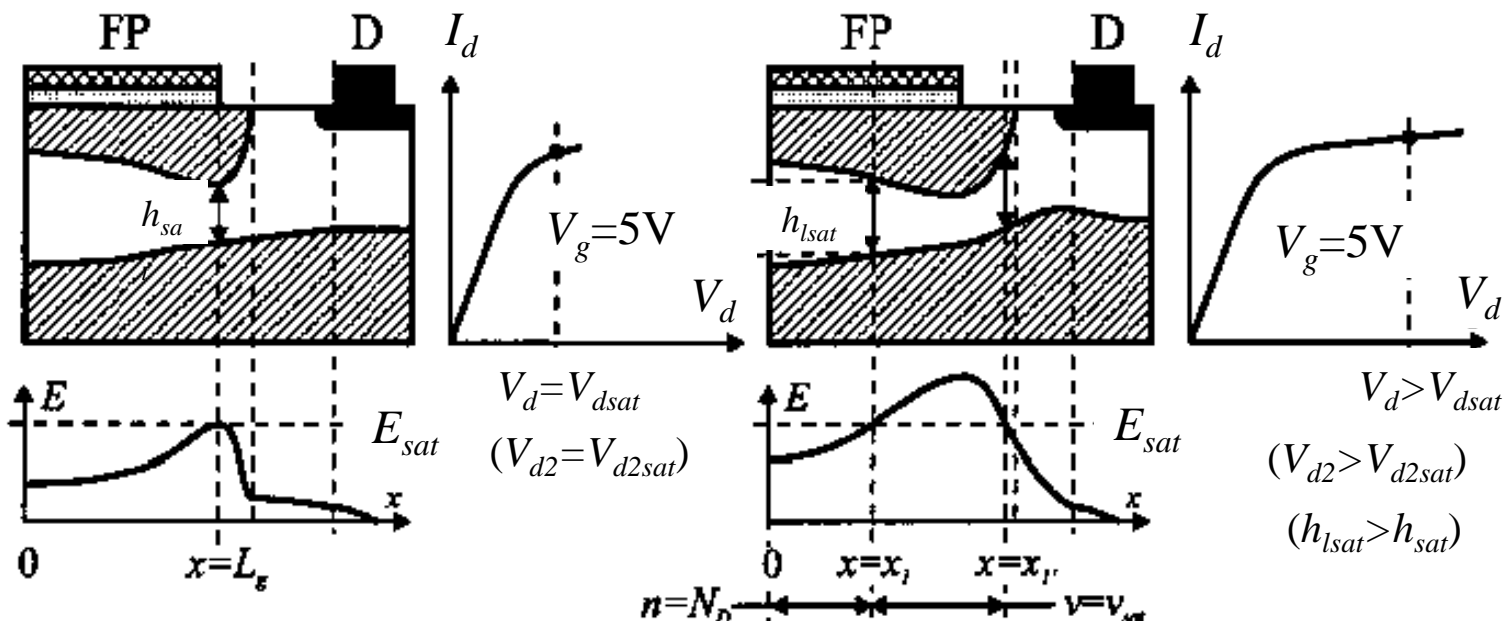
V_{d2sat} は、 I_{fp} の1回微分=ゼロ から求める（数値計算）。

各ドレイン電圧での空乏層形状と電界プロファイル



(a)

(b)



(c)

(d)

By H. Ballan and M. Declercq

電流電圧特性

—有限の出力コンダクタンス—

有限の出力コンダクタンスがある場合

⇒ 電流式にフィテイングパラメータ λ_{hv} を組み込む。

$$I_{fp} = \frac{I_{sat}(1 + \lambda_{hv}V_{gds})}{E_{sat}L_g + V_{d2} - V_{d1}} \left\{ \left(X_j + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \right) (V_{d2} - V_{d1}) - \frac{2}{3} R_b (V_{d2}^{3/2} - V_{d1}^{3/2}) - \frac{2}{3} R_{fp} \left[(A + V_{d2} - V_g')^{3/2} - (A + V_{d1} - V_g')^{3/2} \right] \right\}$$

$$V_{gds} = 0.5 \left[(V_{d2} - V_{d2sat}) + \sqrt{(V_{d2} - V_{d2sat})^2 + K^2} \right]$$

K は $V_{d2} = V_{d2sat}$ で $V_{gds} = 0$ と $V_{gds} = V_{d2}$ 間のトランジションのシャープさを制御するパラメータである。

大きな K ⇒ なめらかなトランジション

小さな K ⇒ 急峻なトランジション

pチャンネル高耐圧トランジスタ1

(p層の線型抵抗としての取り扱い)

p層の濃度：高、 h の変化：小 \Rightarrow p層を線型抵抗
キャリア速度が電界に比例するとした場合 ($v = \mu E_x$)、
電流式は以下で表される。

$$I(x) = v(x)qN_A h W_{hv} = qN_A X_j W_{hv} \mu E_x$$

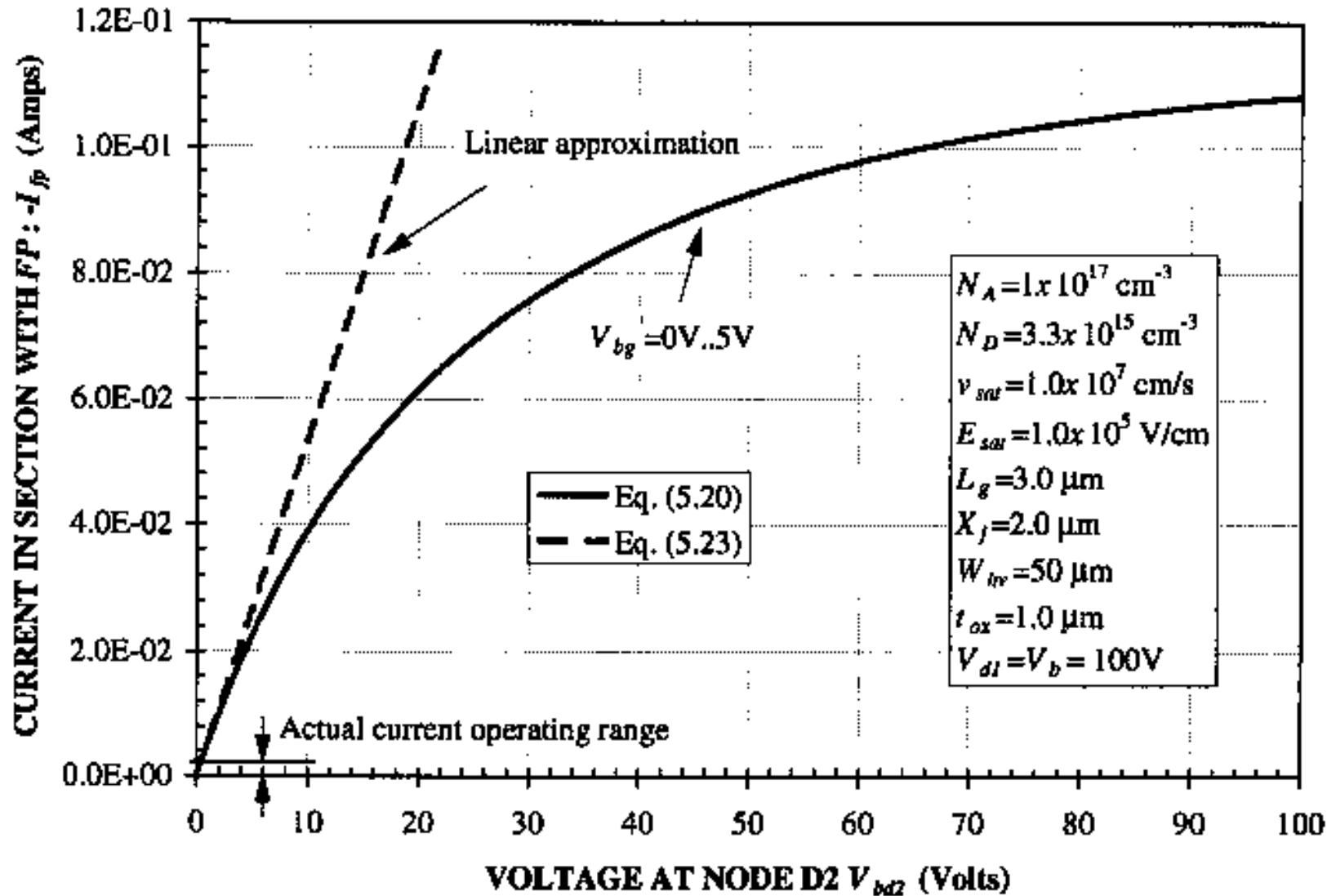
$E_x = dV/dx$ とし、境界条件が $V(x=0) = V_{bd1}$ 、 $V(x=L_g) = V_{bd2}$
の下で、上式をフィールドプレート長に沿って積分すると、
線型化された電流 I_{fp} は以下になる。

$$I_{fp} = G_{fp} (V_{bd2} - V_{bd1}), \quad G_{fp} = \frac{qN_A v_{sat} X_j W_{hv}}{E_{sat} L_g}$$

ここで、 $\mu = v_{sat}/E_{sat}$ とした。 $I_{id'}$ にも適用すると以下になる。

$$I_{id'} = G_{id'} (V_{bd} - V_{bd2}), \quad G_{id'} = \frac{qN_A v_{sat} X_j W_{hv}}{E_{sat} L_d'}$$

電流 I_{fp} - 電圧 V_{bd2} 特性 (HVPMOS)



pチャネル高耐圧トランジスタ2

(p-層の線型抵抗としての取り扱い)

線型コンダクタンス G_{fp} と $G_{id'}$ を同じ電流が流れるため、 I_{fp} と $I_{id'}$ の電流式を一緒にして、

$$I_{ldd} = G_{ldd}(V_{bd} - V_{bd1})$$
$$G_{ldd} = \frac{1}{R_{ldd}} = \frac{qN_A v_{sat} X_j W_{hv}}{E_{sat} L_{dd}}$$

で表される。このように、HVPMOSトランジスタの低ドーブドレインは、簡単な線型抵抗でモデル化される。

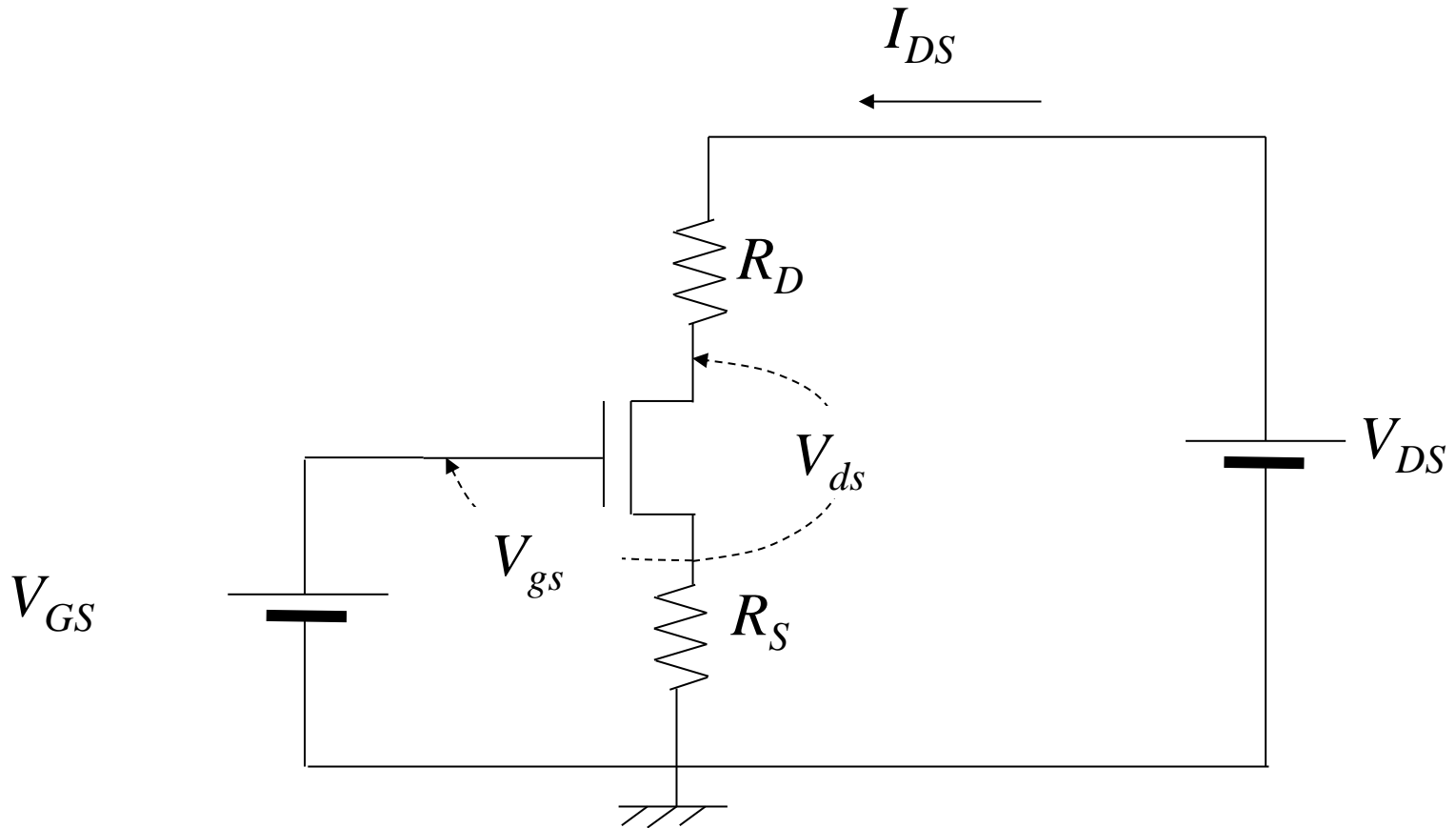
ソース抵抗 R_S とドレイン抵抗 R_D の抽出

R_S と R_D 抽出の基本的な考え方

— R_S と R_D が電圧依存性を持たない場合—

- MOSFETの線型領域の電流電圧特性
 - $R_S + R_D$ 抽出
- MOSFETの飽和領域の電流電圧特性
 - ソースとドレインを入替えて(順逆方向)測定
 - R_S と R_D の差 \Rightarrow 飽和電流の差
 - R_S と R_D を分離して抽出
 - R_{SD} と飽和電流(順逆方向)の実測値から抽出

R_S と R_D の抽出回路



$R_S + R_D$ の抽出1

R_S と R_D を考慮した場合、線型領域の電流式は以下になる。

$$I_{DS} = \frac{\beta_0}{1 + \theta_0(V_{gs} - V_t)} (V_{gs} - V_t) V_{ds}, \quad \beta_0 = \frac{\mu_0 C_{ox} W}{L}$$

$$V_{gs} = V_{GS} - I_{DS} R_S \cong V_{GS}, \quad V_{ds} = V_{DS} - I_{DS} (R_S + R_D)$$

V_{gs} の近似は、ドレイン側のみドリフト層のある高耐圧Trでは成立する。上記 V_{gs} と V_{ds} を I_{DS} の式に代入して整理すると、

$$\frac{I_{DS}}{V_{DS}} = \frac{\beta_0 (V_{GS} - V_t)}{1 + \theta_0 (V_{GS} - V_t) + \beta_0 (R_S + R_D) (V_{GS} - V_t)}$$
$$\Rightarrow I_{DS} = \frac{\beta_0 (V_{GS} - V_t) V_{DS}}{1 + [\theta_0 + \beta_0 (R_S + R_D)] (V_{GS} - V_t)} = \frac{\beta_0 (V_{GS} - V_t) V_{DS}}{1 + \theta_{eff} (V_{GS} - V_t)}$$

$R_S + R_D$ の抽出2

- θ_{eff} の導出

$$\frac{I_{DS0}}{I_{DS}} = 1 + \theta_{eff} (V_{GS} - V_t), \quad \text{但し、} I_{DS0} = \beta_0 (V_{GS} - V_t) V_{DS}$$

$\Rightarrow \frac{I_{DS0}}{I_{DS}}$ と $V_{GS} - V_t$ の関係の傾きから θ_{eff} を求める

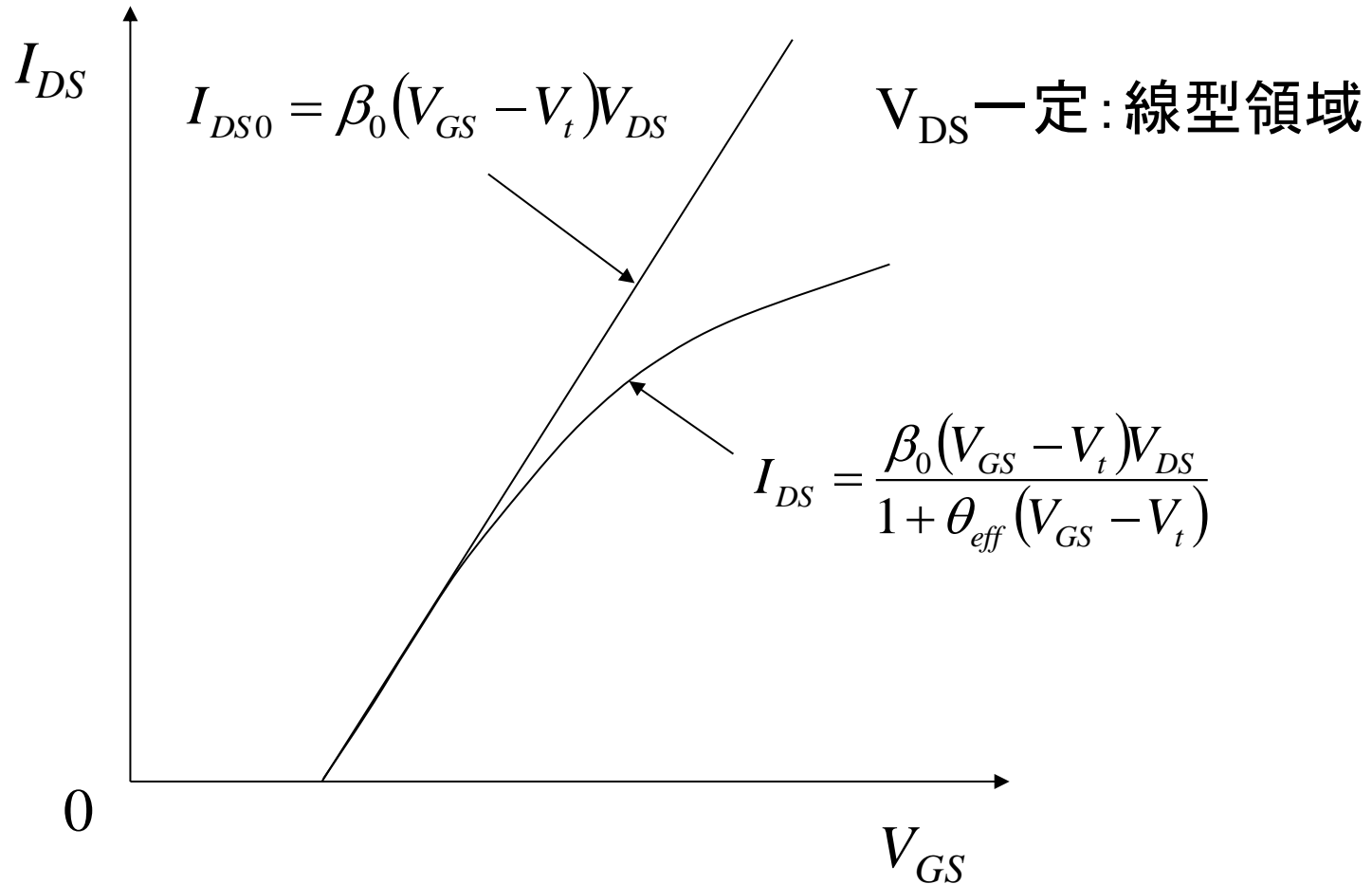
- L を変えて θ_{eff} の導出 (W :一定)

- $R_S + R_D$ の導出

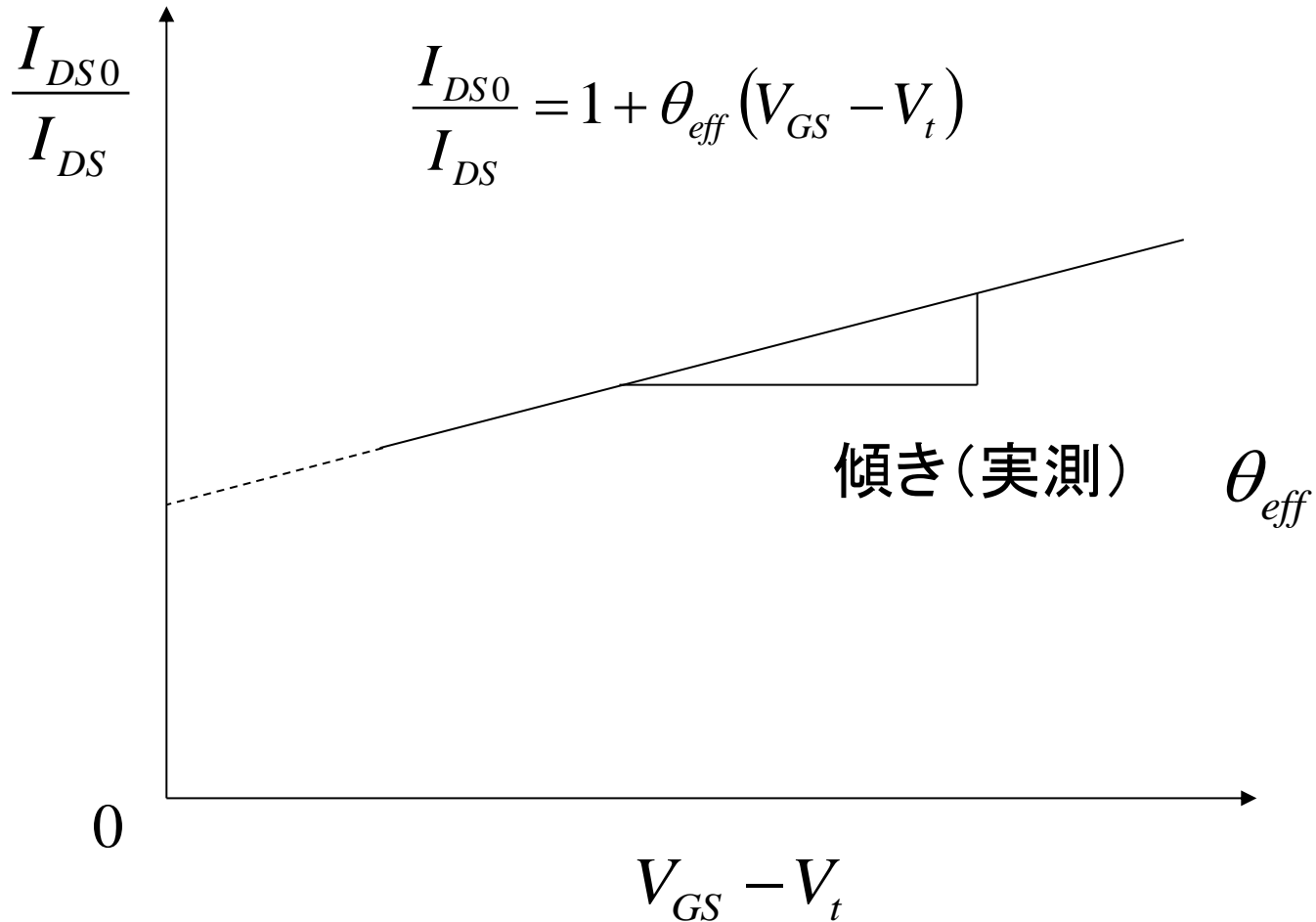
$$\theta_{eff} = \theta_0 + \beta_0 (R_S + R_D) = \theta_0 + \frac{\mu_0 C_{ox} W}{L} (R_S + R_D)$$

$\Rightarrow \theta_{eff}$ と $1/L$ の関係の傾きから、 $R_S + R_D (= R_{SD})$ が求まる

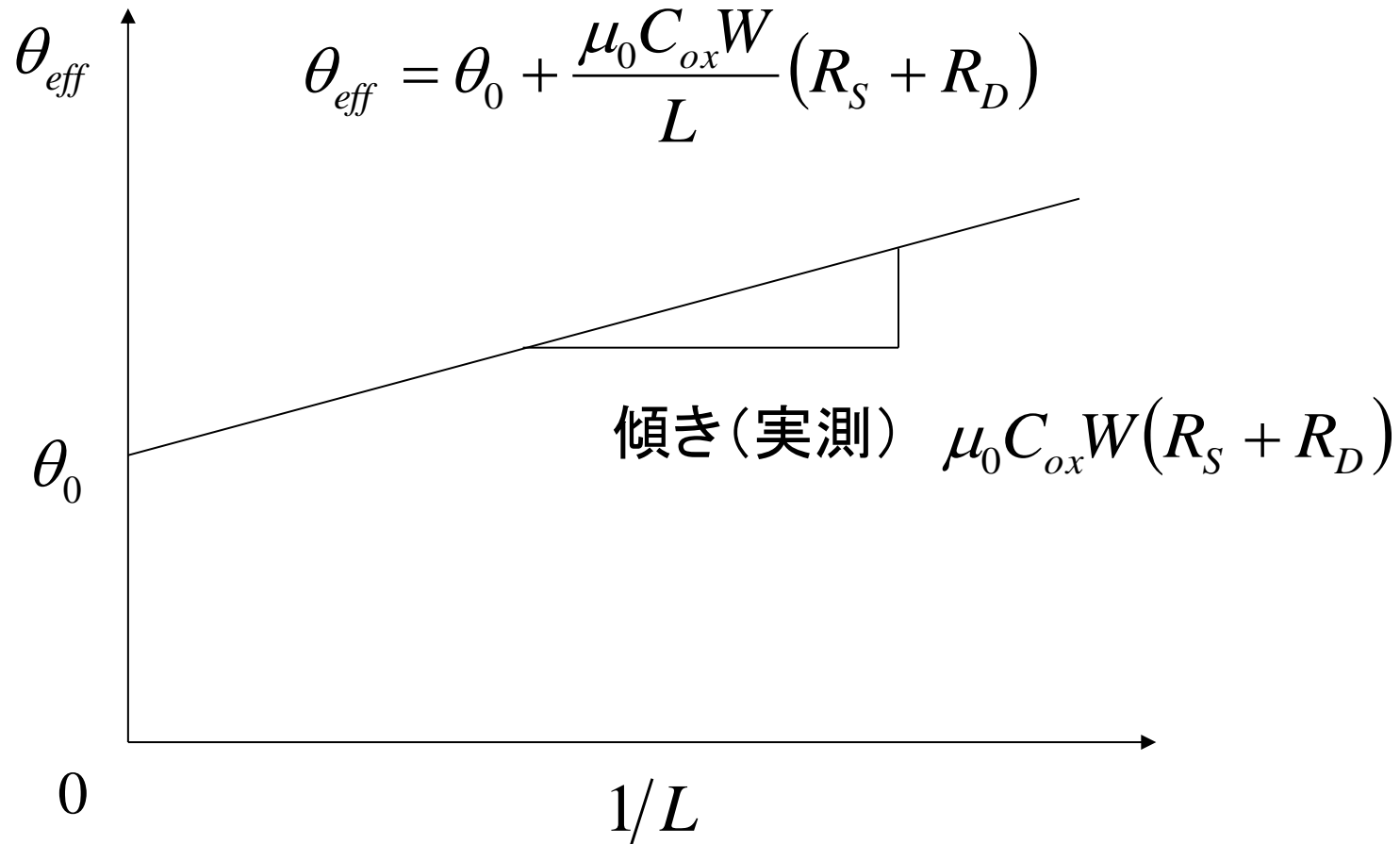
$R_S + R_D$ の抽出3



$R_S + R_D$ の抽出4

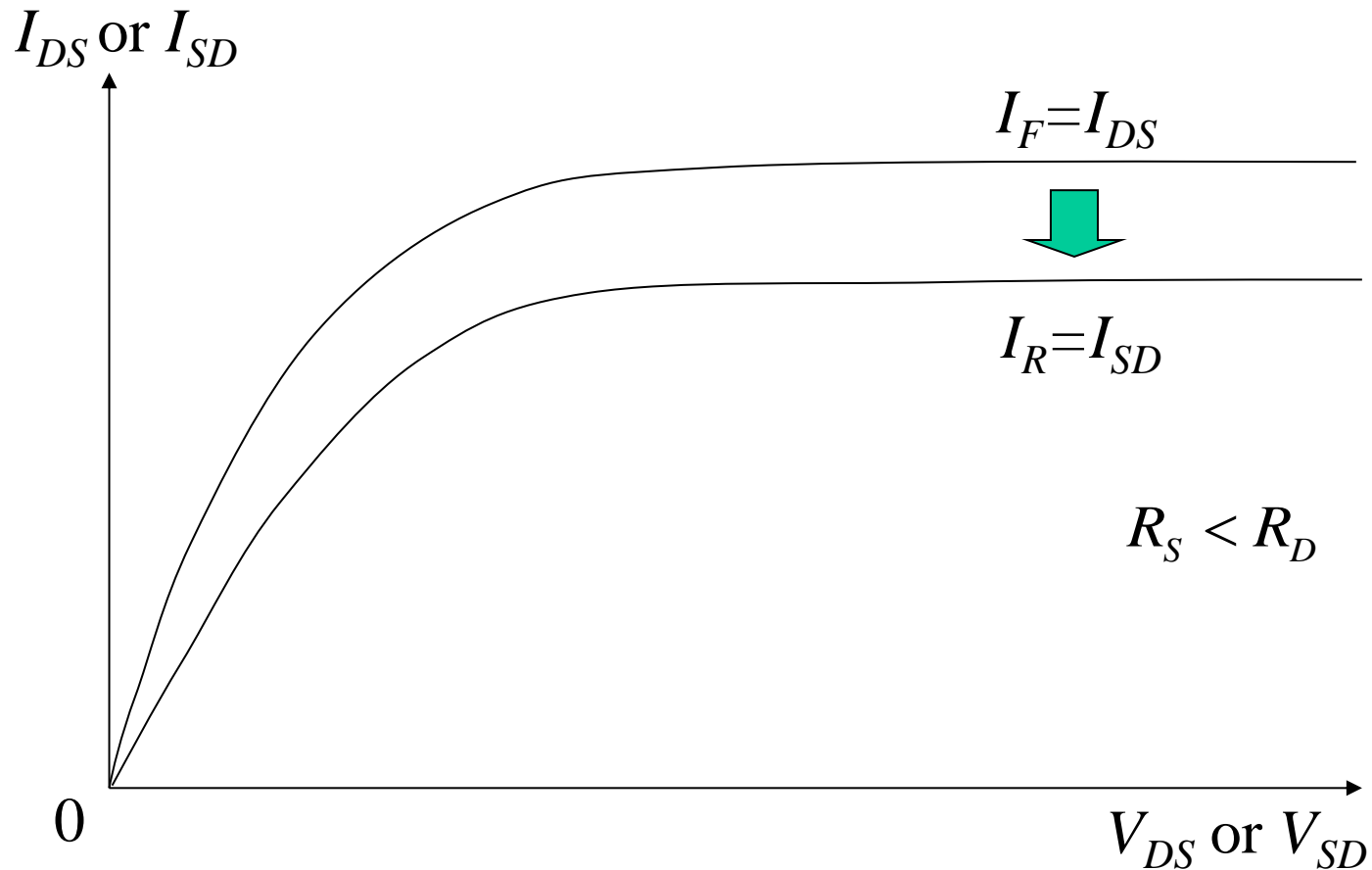


$R_S + R_D$ の抽出5



R_S と R_D を分離して抽出1

—順方向と逆方向の飽和電流使用—



R_S と R_D を分離して抽出2

順方向の飽和電流 I_F

$$I_F [= I_{DS}] = \frac{1}{2} \frac{\mu_F C_{ox} W}{\alpha L} (V_{gs} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_F C_{ox} W}{\alpha L} (V_{GS} - R_S I_F - V_t)^2 \quad \textcircled{1}$$

逆方向の飽和電流 I_R

$$I_R [= I_{SD}] = \frac{1}{2} \frac{\mu_R C_{ox} W}{\alpha L} (V_{gd} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_R C_{ox} W}{\alpha L} (V_{GD} - R_D I_R - V_t)^2 \quad \textcircled{2}$$

①/②

$$\frac{I_F}{I_R} = \frac{\mu_F}{\mu_R} \left(\frac{V_{GS} - R_S I_F - V_t}{V_{GD} - R_D I_R - V_t} \right)^2$$

$\mu_F \cong \mu_R$, $V_{GS} = V_{GD}$ とすると、

$$I_F R_S - \sqrt{I_F I_R} R_D = \left(1 - \sqrt{\frac{I_F}{I_R}} \right) (V_{GS} - V_t) \quad \textcircled{3}$$

R_S と R_D を分離して抽出3

飽和領域で求めた③式

$$I_F R_S - \sqrt{I_F I_R} R_D = \left(1 - \sqrt{\frac{I_F}{I_R}}\right) (V_{GS} - V_t)$$

と線型領域で求めた下記の式

$$R_S + R_D = R_{SD}$$

から、 R_S と R_D をそれぞれ求めると、以下になる。

$$R_S = \frac{\sqrt{I_R}}{\sqrt{I_F} + \sqrt{I_R}} R_{SD} - \frac{1}{\sqrt{I_F I_R}} \frac{\sqrt{I_F} - \sqrt{I_R}}{\sqrt{I_F} + \sqrt{I_R}} (V_{GS} - V_t)$$

$$R_D = \frac{\sqrt{I_F}}{\sqrt{I_F} + \sqrt{I_R}} R_{SD} + \frac{1}{\sqrt{I_F I_R}} \frac{\sqrt{I_F} - \sqrt{I_R}}{\sqrt{I_F} + \sqrt{I_R}} (V_{GS} - V_t)$$