

QS (Quasi Static) 動作

(大信号モデル)

群馬大学
松田順一

概要

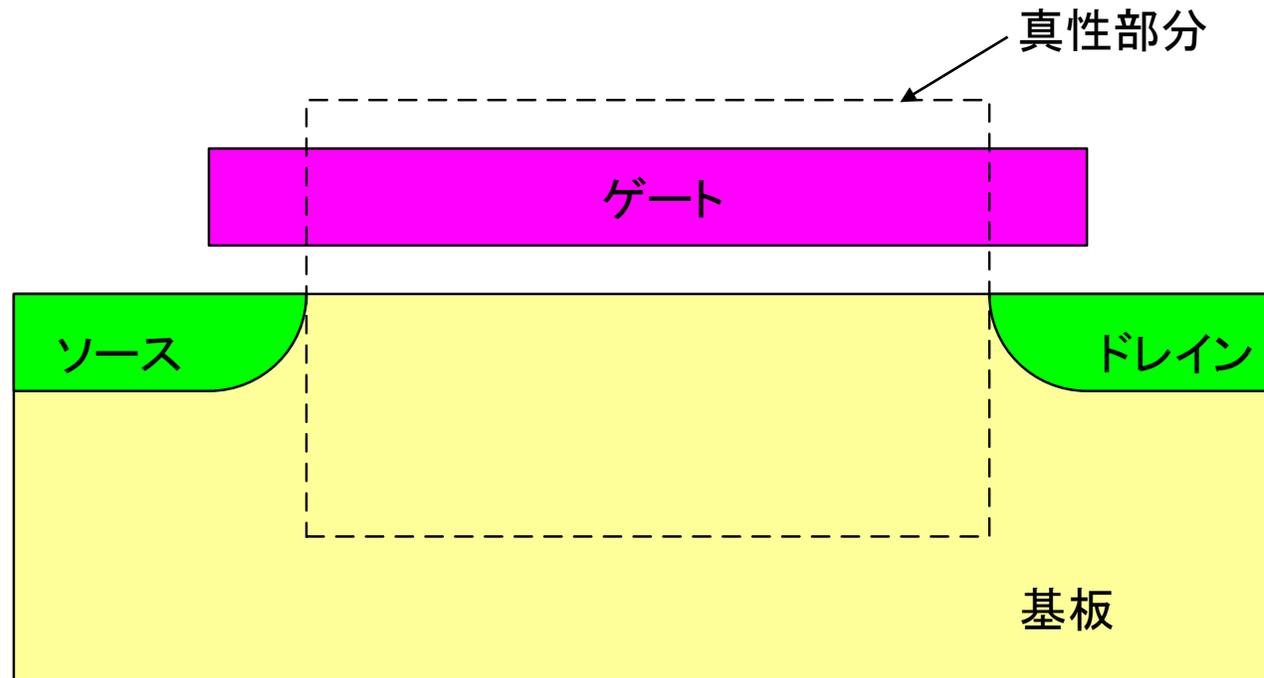
- QS(準定常)動作
- QS動作における端子電流
- QS動作における電荷
 - 強反転
 - 弱反転
- DC条件の下での通過時間
- QSモデルの限界
- Non-QSモデル
- 付録
 - 電流連続の式

(注)以下の本を参考に、本資料を作成。

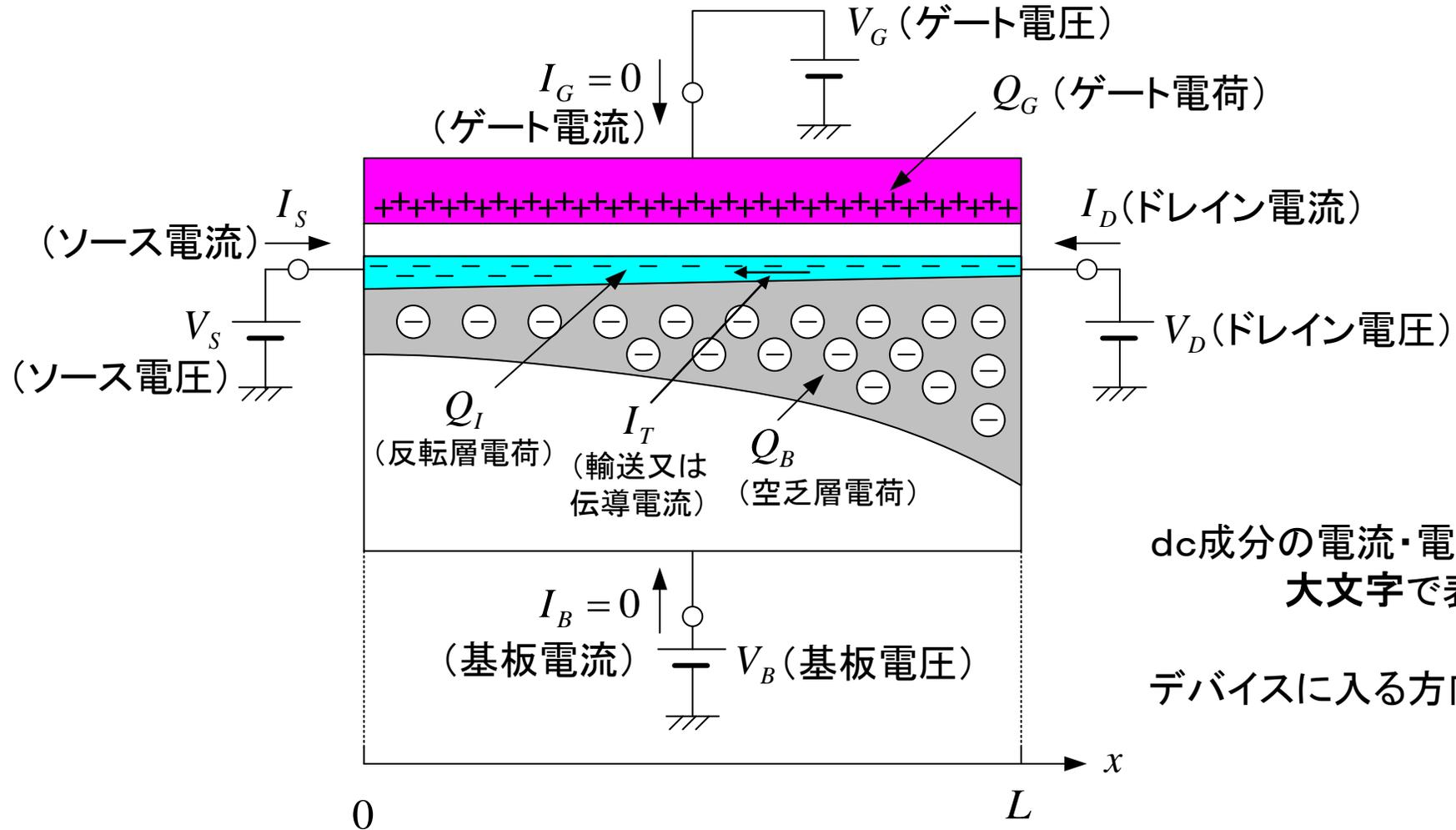
(1) Yannis Tsividis, Operation and Modeling of the MOS Transistor Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1999.

(2) Yannis Tsividis and Colin McAndrew, Operation and Modeling of the MOS Transistor Third Edition, Oxford University Press, New York, 2011.

トランジスタの動特性検討領域(真性部分)



dc印加における電流と電荷の定義



dc成分の電流・電圧の記号は
大文字で表記

デバイスに入る方向の電流が正

dc電圧印加時の電流と電荷

dc電圧印加時の電流

$$I_D = I_T, \quad I_G = 0, \quad I_B = 0, \quad I_S = -I_T$$

$$I_T = h_T(V_D, V_G, V_B, V_S), \quad h_T: \text{任意の関数}$$

dc電圧印加時の電荷

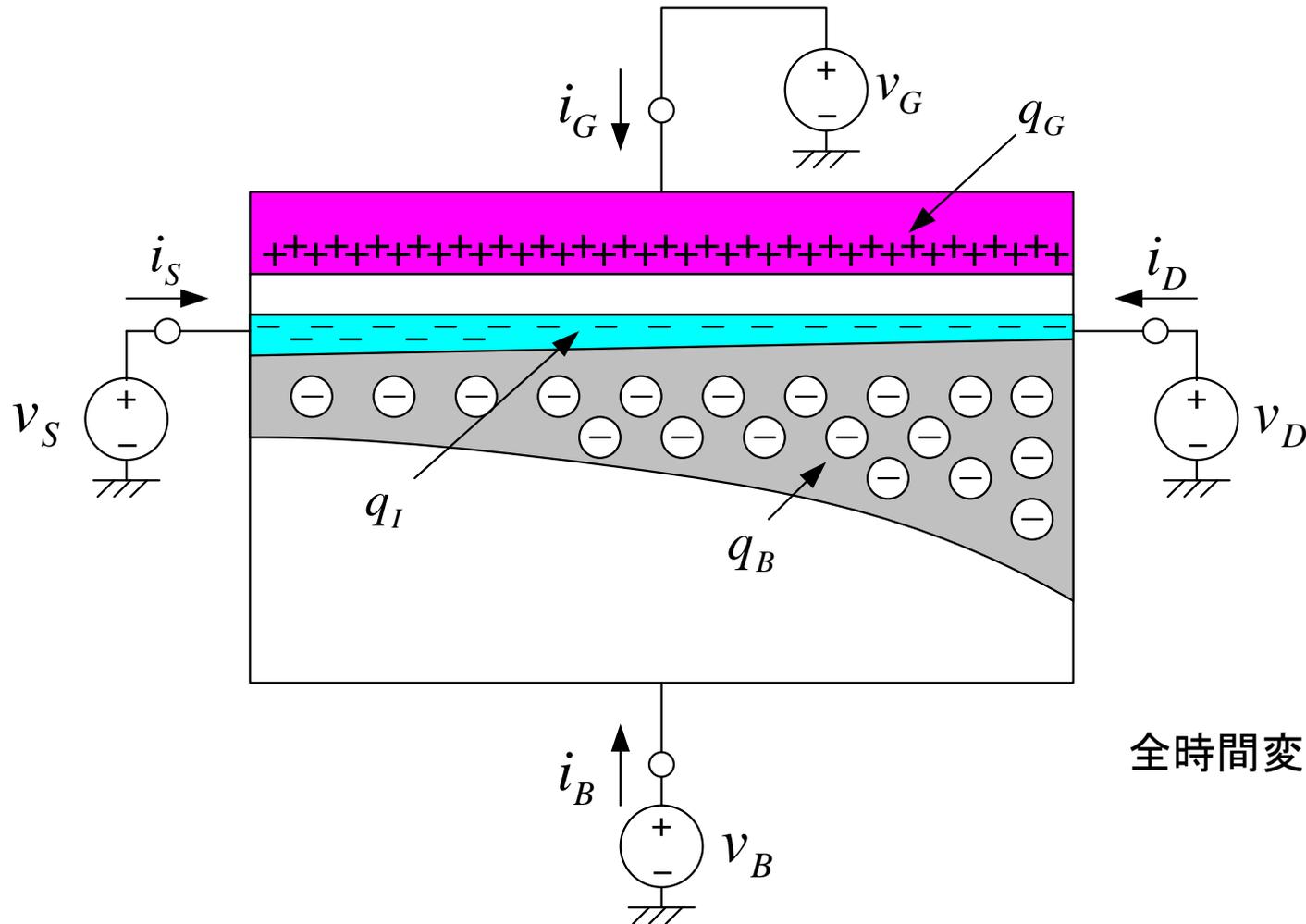
$$Q_I = f_I(V_D, V_G, V_B, V_S), \quad Q_I = W \int_0^L Q_I' dx$$

$$Q_G = f_G(V_D, V_G, V_B, V_S), \quad Q_G = W \int_0^L Q_G' dx$$

$$Q_B = f_B(V_D, V_G, V_B, V_S), \quad Q_B = W \int_0^L Q_B' dx$$

f_I, f_G, f_B : 任意の関数

変動端子電圧における電流と電荷の定義



全時間変化する電流・電圧の記号は
小文字で表記

QS(準定常)動作

QS状態の定義

端子電圧が時間変化する ($v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t)$) した場合の各場所で各時刻 t' における単位面積当りの電荷は、dc電圧が印加された場合と同じになる。

$$V_D = v_D(t'), V_G = v_G(t'), V_B = v_B(t'), V_S = v_S(t')$$

電荷の全時間変化量

$$q_I(t) = f_I(v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t))$$

$$q_G(t) = f_G(v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t))$$

$$q_B(t) = f_B(v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t))$$

QS状態の場合、 f_I , f_G , f_B はdcの場合と同じ関数になる。

但し、電流はdcの場合と同じにならない。

QS状態における端子電流

ゲート電流（ゲート電荷の変化）

$$i_G(t) = \frac{dq_G}{dt} \quad (\text{但し、ゲートのリーク電流} = 0)$$

基板電流（空乏層の電荷変化）

$$i_B(t) = \frac{dq_B}{dt} \quad (\text{但し、基板のリーク電流} = 0)$$

ソースとドレイン電流の和

(チャンネルに入る全電流：反転層電荷の変化)

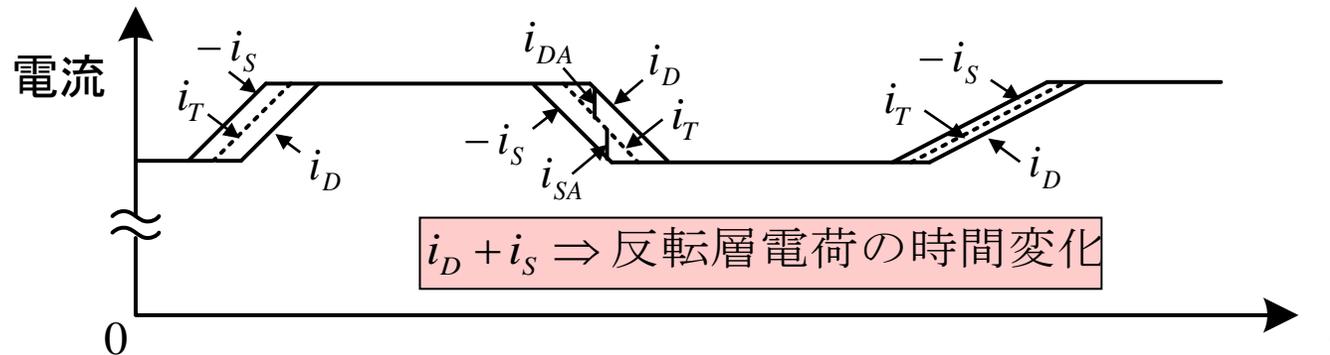
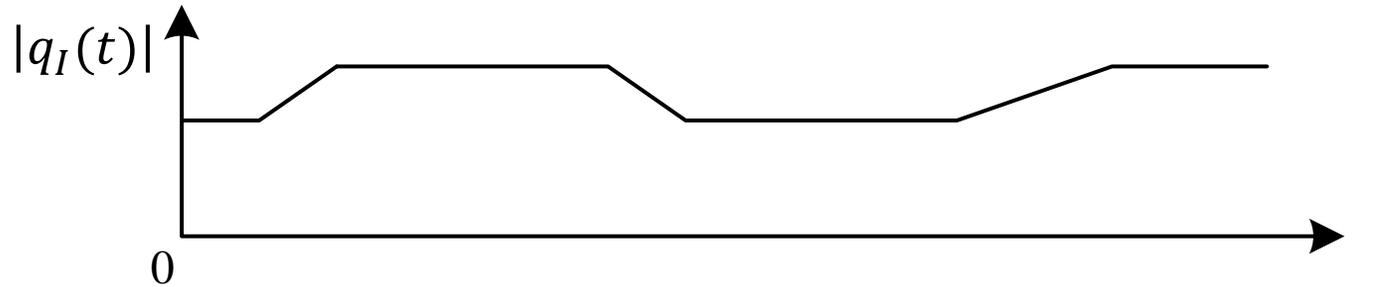
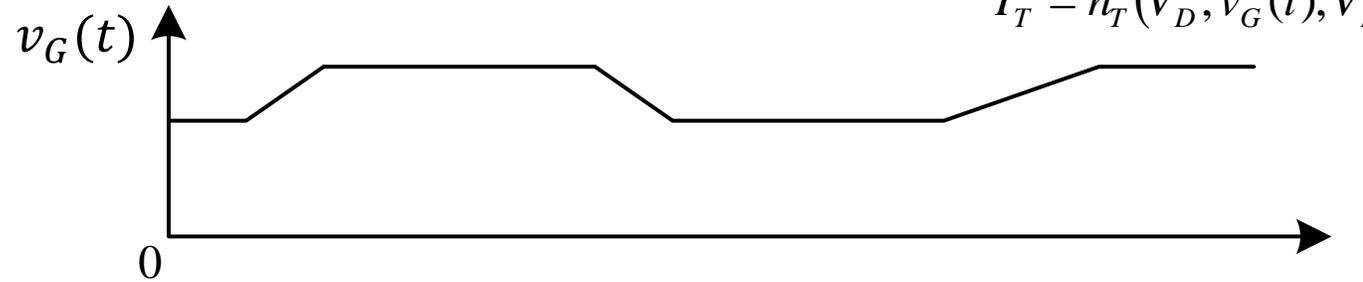
$$i_D(t) + i_S(t) = \frac{dq_I}{dt}$$

ここで、dcの場合、 $i_D(t) = -i_S(t)$ であるから、 $dq_I/dt = 0$ となる。

電圧が変化する場合 $i_D(t) \neq -i_S(t)$ であるから、 $dq_I/dt \neq 0$ となる。

ゲート電圧変化に対応した電流変化

$$I_T = h_T(V_D, v_G(t), V_B, V_S)$$



仮想的な電荷と反転層電荷

i_D と i_S は、以下の如く表される。

$$i_D(t) = i_T(t) + i_{DA}(t), \quad i_S(t) = -i_T(t) + i_{SA}(t)$$

ここで、 $i_D(t) + i_S(t) = dq_I/dt$ から、

$$i_{DA}(t) + i_{SA}(t) = \frac{dq_I}{dt}$$

となる。ここで、

$$i_{DA}(t): \Delta t \text{後に反転層電荷を} \Delta q_D \text{だけ変える。} \Rightarrow i_{DA}(t) = \frac{dq_D}{dt}$$

$$i_{SA}(t): \Delta t \text{後に反転層電荷を} \Delta q_S \text{だけ変える。} \Rightarrow i_{SA}(t) = \frac{dq_S}{dt}$$

したがって、以下の関係が得られる。

$$\frac{dq_D}{dt} + \frac{dq_S}{dt} = \frac{dq_I}{dt} \Rightarrow q_D(t) + q_S(t) = q_I(t)$$

q_D : ドレインに関連付けられた反転層電荷(ドレイン電荷)
 q_S : ソースに関連付けられた反転層電荷(ソース電荷)

q_D と q_S の表現(1)

電流連続の式

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = W \frac{\partial q_I'}{\partial t} \quad \Rightarrow \text{付録参照}$$

をソースからチャネル内の点 x まで積分すると、

$$i(x,t) - i(0,t) = W \int_0^x \frac{\partial q_I'(\hat{x},t)}{\partial t} d\hat{x}$$

となる。ここで、

$$i(0,t) \Rightarrow -i_S(t), \quad i(x,t) \Rightarrow -\mu W q_I'(x,t) \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x}$$

とすると、 $i_S(t)$ は以下の如くになる。

$$i_S(t) = \mu W q_I'(x,t) \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x} + W \int_0^x \frac{\partial q_I'(\hat{x},t)}{\partial t} d\hat{x}$$

q_Dとq_Sの表現(2)

$i_S(t)$ の両辺に dx を掛け、 $x=0$ から $x=L$ まで積分し、両辺を L で割ると、

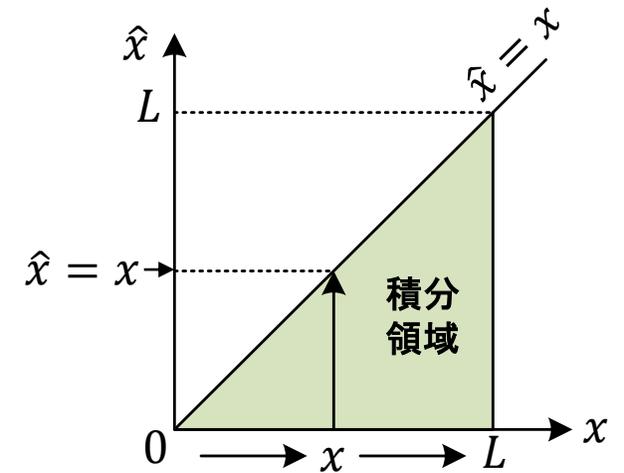
$$i_S(t) = \frac{W}{L} \int_0^L \mu q_I'(x,t) \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x} dx + \frac{W}{L} \int_0^L \int_0^x \frac{\partial q_I'(\hat{x},t)}{\partial t} d\hat{x} dx$$

となる。右辺第二項の積分と微分の順序をかえると、

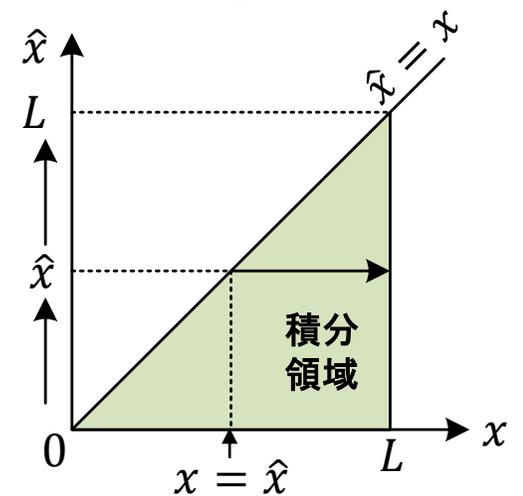
$$i_S(t) = \frac{W}{L} \int_0^L \mu q_I'(x,t) \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x} dx + \frac{d}{dt} \left[\frac{W}{L} \int_0^L \int_0^x q_I'(\hat{x},t) d\hat{x} dx \right]$$

となる。更に、右辺第二項の積分の順番を変えると、以下になる。

$$\begin{aligned} i_S(t) &= -\frac{W}{L} \int_0^L \mu [-q_I'(x,t)] \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x} dx + \frac{d}{dt} \left[\frac{W}{L} \int_0^L \int_{\hat{x}}^L q_I'(\hat{x},t) dx d\hat{x} \right] \\ &= -\frac{W}{L} \int_0^L \mu [-q_I'(x,t)] \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x} dx + \frac{d}{dt} \left[W \int_0^L q_I'(\hat{x},t) \left(1 - \frac{\hat{x}}{L} \right) d\hat{x} \right] \end{aligned}$$



積分の順番を変更



q_D と q_S の表現(3)

ここで得られた $i_S(t)$ の右辺第一項は、強反転でのdcバイアスにおける電流（トランスポート電流： $-i_T$ ）を与える。したがって、 $i_S(t)$ は

$$i_S(t) = -i_T(t) + \frac{dq_S}{dt}$$

であるから、 q_S は以下の如く表される。

$$q_S = W \int_0^L q_I'(x,t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) dx$$

一方、 $x=L$ では、 $i_D(t) = i(L,t)$ であるから、

$$i(L,t) - i(0,t) = i_D(t) + i_S(t) = W \int_0^L \frac{\partial q_I'(x,t)}{\partial t} dx$$

となる。これから、 $i_D(t)$ は以下の如くになる。

$$i_D(t) = i_T(t) - \frac{d}{dt} \left[W \int_0^L q_I'(x,t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) dx \right] + \frac{d}{dt} \left[W \int_0^L q_I'(x,t) dx \right] = i_T(t) + \frac{d}{dt} \left[W \int_0^L q_I'(x,t) \frac{x}{L} dx \right]$$

q_D と q_S の表現(4)

$i_D(t)$ は以下の如く与えられるから、

$$i_D(t) = i_T(t) + \frac{dq_D}{dt}$$

この式と前式とを比較すると q_D は、

$$q_D = W \int_0^L q_I'(x,t) \frac{x}{L} dx$$

となる。準定常状態の場合、

$$q_I' \Rightarrow Q_I', \quad q_S \Rightarrow Q_S, \quad q_D \Rightarrow Q_D$$

となるため、 Q_S と Q_D は以下の如く表される。

$$Q_S = W \int_0^L Q_I'(x,t) \left(1 - \frac{x}{L}\right) dx, \quad Q_D = W \int_0^L Q_I'(x,t) \frac{x}{L} dx$$

各電流と各端子電圧の関係

$$i_{DA} = \frac{dq_D}{dt} = \frac{\partial q_D}{\partial v_D} \frac{dv_D}{dt} + \frac{\partial q_D}{\partial v_G} \frac{dv_G}{dt} + \frac{\partial q_D}{\partial v_B} \frac{dv_B}{dt} + \frac{\partial q_D}{\partial v_S} \frac{dv_S}{dt}$$

$$i_G = \frac{dq_G}{dt} = \frac{\partial q_G}{\partial v_D} \frac{dv_D}{dt} + \frac{\partial q_G}{\partial v_G} \frac{dv_G}{dt} + \frac{\partial q_G}{\partial v_B} \frac{dv_B}{dt} + \frac{\partial q_G}{\partial v_S} \frac{dv_S}{dt}$$

$$i_B = \frac{dq_B}{dt} = \frac{\partial q_B}{\partial v_D} \frac{dv_D}{dt} + \frac{\partial q_B}{\partial v_G} \frac{dv_G}{dt} + \frac{\partial q_B}{\partial v_B} \frac{dv_B}{dt} + \frac{\partial q_B}{\partial v_S} \frac{dv_S}{dt}$$

$$i_{SA} = \frac{dq_S}{dt} = \frac{\partial q_S}{\partial v_D} \frac{dv_D}{dt} + \frac{\partial q_S}{\partial v_G} \frac{dv_G}{dt} + \frac{\partial q_S}{\partial v_B} \frac{dv_B}{dt} + \frac{\partial q_S}{\partial v_S} \frac{dv_S}{dt}$$

$$Q_D(t) = f_D(V_D(t), V_G(t), V_B(t), V_S(t))$$

$$Q_S(t) = f_S(V_D(t), V_G(t), V_B(t), V_S(t))$$

$$q_D(t) = f_D(v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t))$$

$$q_S(t) = f_S(v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t))$$

$$i_T = h_T(v_D(t), v_G(t), v_B(t), v_S(t)), \quad h_T : \text{dcの場合と同じ関数}$$

キルヒホッフの電流の法則

全電流に関して、

$$i_D(t) + i_G(t) + i_B(t) + i_S(t) = 0$$

が成り立つ。また、

$$i_{DA}(t) + i_G(t) + i_B(t) + i_{SA}(t) = 0$$

も成り立つ。

準定常動作における強反転領域の電荷(1) (非飽和における全般的表現)

ゲート電荷 Q_G は

$$Q_G = W \int_0^L Q'_G dx$$
$$= W \int_{V_{SB}}^{V_{DB}} Q'_G \left(-\frac{\mu W}{I_{DSN}} Q'_I \right) dV_{CB} = -\frac{\mu W^2}{I_{DSN}} \int_{V_{SB}}^{V_{DB}} Q'_G Q'_I dV_{CB}$$

となる。 $\left[\text{但し、} I_{DSN} = \mu W (-Q'_I) \frac{dV_{CB}}{dx} \Rightarrow dx = -\frac{\mu W}{I_{DSN}} Q'_I dV_{CB} \right]$

同様に空乏層電荷 Q_B は以下の如くなる。

$$Q_B = W \int_0^L Q'_B dx = -\frac{\mu W^2}{I_{DSN}} \int_{V_{SB}}^{V_{DB}} Q'_B Q'_I dV_{CB}$$

準定常動作における強反転領域の電荷(2) (非飽和における全般的表現)

反転層電荷 Q_I 、ドレインに関連付けられた反転層電荷(ドレイン電荷) Q_D 、及びソースに関連付けられた反転層電荷(ソース電荷) Q_S は

$$Q_I = W \int_0^L Q'_I dx = -\frac{\mu W^2}{I_{DSN}} \int_{V_{SB}}^{V_{DB}} Q_I'^2 dV_{CB}$$
$$Q_D = -\frac{\mu W^2}{I_{DSN}} \int_{V_{SB}}^{V_{DB}} \frac{x}{L} Q_I'^2 dV_{CB}, \quad Q_S = -\frac{\mu W^2}{I_{DSN}} \int_{V_{SB}}^{V_{DB}} \left(1 - \frac{x}{L}\right) Q_I'^2 dV_{CB}$$

となる。上式で x は

$$x = -\frac{\mu W}{I_{DSN}} \int_{V_{SB}}^{V_{CB}} Q'_I dV_{CB}, \quad \left[\text{但し、} dx = -\frac{\mu W}{I_{DSN}} Q'_I dV_{CB} \right]$$

となる。また x は以下の式でも表される。

$$x = L \frac{h(V_{GB}, V_{SB}, V_{CB})}{h(V_{GB}, V_{SB}, V_{DB})}, \quad \left[\text{但し、} I_{DSN} = \frac{W}{L} h(V_{GB}, V_{SB}, V_{DB}) \right]$$

準定常動作における強反転領域の電荷(3) (飽和を含む単純化モデル)

単純化されたソース参照強反転モデルを使用する。

$$I_{DS} = I'_{DS}(1 - \eta^2)$$

$$I'_{DS} = \frac{W}{L} \mu C'_{ox} \frac{(V_{GS} - V_T)^2}{2\alpha}, \quad \eta = \begin{cases} 1 - \frac{V_{DS}}{V'_{DS}}, & V_{DS} \leq V'_{DS} \\ 0, & V_{DS} > V'_{DS} \end{cases} \quad V'_{DS} = \frac{V_{GS} - V_T}{\alpha}$$

ここでは、 Q'_I と Q'_B は以下の式で与えられる。

$$Q'_I = -C'_{ox} [V_{GB} - V_{SB} - V_T - \alpha(V_{CB} - V_{SB})]$$

$$Q'_B = -C'_{ox} [\gamma \sqrt{\phi_0 + V_{SB}} + (\alpha - 1)(V_{CB} - V_{SB})]$$

⇒ 4端子MOSTランジスタ p.32 参照

これらから、 Q_I, Q_B, Q_G, Q_D, Q_S をそれぞれ求める。

準定常動作における強反転領域の電荷(4)

Q_I と Q_B は以下の如くなる。

$$Q_I = -WLC'_{ox}(V_{GS} - V_T) \frac{2}{3} \frac{1 + \eta + \eta^2}{1 + \eta}$$

$$Q_B = -WLC'_{ox} \left[\gamma \sqrt{\phi_0 + V_{SB}} + \frac{\alpha - 1}{\alpha} (V_{GS} - V_T) \left(1 - \frac{2}{3} \frac{1 + \eta + \eta^2}{1 + \eta} \right) \right]$$

$Q_G + Q_o + Q_I + Q_B = 0$ から、

$$Q_G = WLC'_{ox} \left[\frac{V_{GS} - V_T}{\alpha} \left(\alpha - 1 + \frac{2}{3} \frac{1 + \eta + \eta^2}{1 + \eta} \right) + \gamma \sqrt{\phi_0 + V_{SB}} \right] - Q_o$$

となる。また、 Q_D と Q_S は以下の如くなる。

$$Q_D = -WLC'_{ox}(V_{GS} - V_T) \frac{4 + 8\eta + 12\eta^2 + 6\eta^3}{15(1 + \eta)^2}, \quad Q_S = -WLC'_{ox}(V_{GS} - V_T) \frac{6 + 12\eta + 8\eta^2 + 4\eta^3}{15(1 + \eta)^2}$$

Q_S と Q_D での計算に以下の x を用いる。

$$x = L \frac{(V_{GS} - V_T)(V_{CB} - V_{SB}) - \frac{1}{2} \alpha (V_{CB} - V_{SB})^2}{(V_{GS} - V_T)(V_{DB} - V_{SB}) - \frac{1}{2} \alpha (V_{DB} - V_{SB})^2}$$

$\eta=1$ ($V_{DS}=0$)における電荷(強反転)

$\eta=1$ ($V_{DS}=0$)における Q_B, Q_I, Q_D, Q_S, Q_G は以下になる。

$$Q_B|_{V_{DS}=0} = -WLC'_{ox}\gamma\sqrt{\phi_0 + V_{SB}}$$

$$Q_I|_{V_{DS}=0} = -WLC'_{ox}(V_{GS} - V_T)$$

$$Q_D|_{V_{DS}=0} = -\frac{WLC'_{ox}(V_{GS} - V_T)}{2}$$

$$Q_S|_{V_{DS}=0} = -\frac{WLC'_{ox}(V_{GS} - V_T)}{2}$$

$$Q_G|_{V_{DS}=0} = WLC'_{ox}\left[(V_{GS} - V_T) + \gamma\sqrt{\phi_0 + V_{SB}}\right] - Q_o$$

飽和領域 ($\eta=0$) における電荷 (強反転)

飽和領域 $\eta = 0$ における Q_B, Q_I, Q_D, Q_S, Q_G は以下になる。

$$Q_{B,sat} = -WLC'_{ox} \left[\gamma \sqrt{\phi_0 + V_{SB}} + \frac{\alpha - 1}{3\alpha} (V_{GS} - V_T) \right]$$

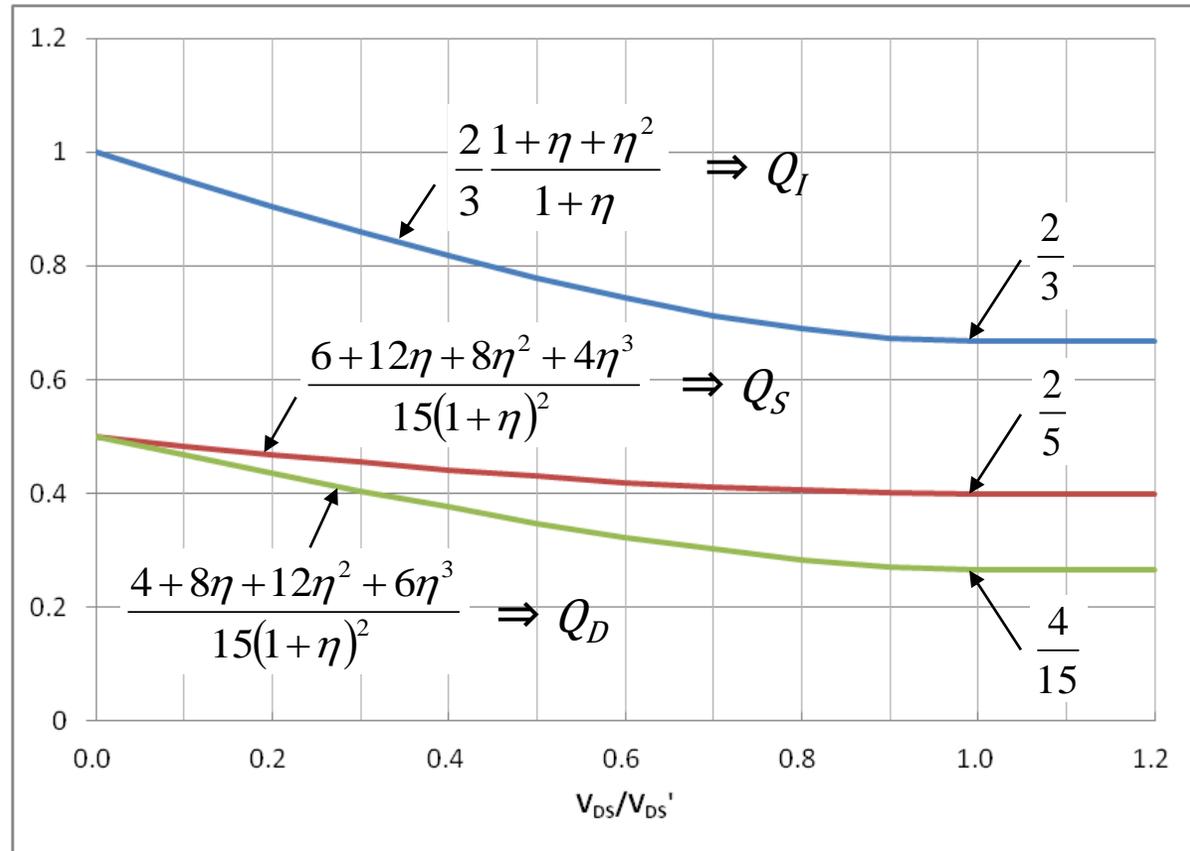
$$Q_{I,sat} = -\frac{2}{3} WLC'_{ox} (V_{GS} - V_T)$$

$$Q_{D,sat} = -\frac{4}{15} WLC'_{ox} (V_{GS} - V_T)$$

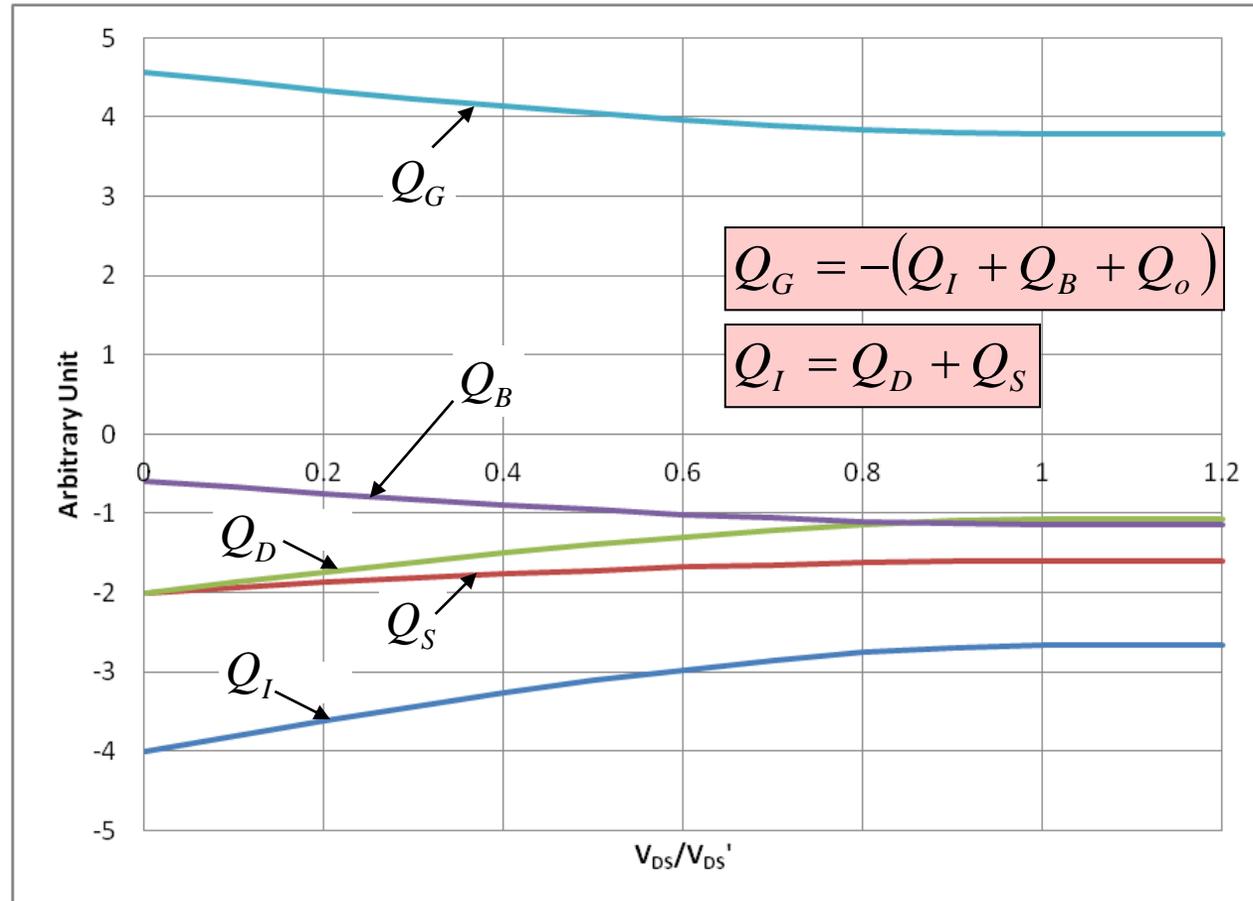
$$Q_{S,sat} = -\frac{2}{5} WLC'_{ox} (V_{GS} - V_T)$$

$$Q_{G,sat} = WLC'_{ox} \left[\frac{V_{GS} - V_T}{\alpha} \left(\alpha - \frac{1}{3} \right) + \gamma \sqrt{\phi_0 + V_{SB}} \right] - Q_o$$

Q_I, Q_S, Q_D 成分の V_{DS}/V_{DS}' 依存性



各電荷の V_{DS}/V_{DS}' 依存性



弱反転での電荷(1)

単位面積当りの空乏層電荷は

$$Q_B' = -\gamma C_{ox}' \sqrt{\psi_s}$$

であり、弱反転領域では ψ_s は

$$\psi_s \approx \psi_{sa} = \left(-\frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB}} \right)^2$$

となる。したがって、全空乏層電荷は

$$Q_B = -WLC_{ox}' \gamma \left(-\frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB}} \right)$$

となる。ゲート電荷は以下となる。

$$Q_G \approx -Q_B - Q_o \quad (\because Q_G + Q_o + Q_I + Q_B = 0, \quad Q_I \ll Q_B)$$

弱反転での電荷(2)

単位面積当りの反転層電荷は

$$Q_I'(x) = Q_{I0}' + \frac{x}{L}(Q_{IL}' - Q_{I0}')$$

であるから、全反転層電荷は、

$$Q_I = W \int_0^L Q_I' dx = WL \frac{Q_{I0}' + Q_{IL}'}{2}$$

となる。 Q_D と Q_S は、

$$Q_D = W \int_0^L Q_I' \frac{x}{L} dx = WL \left(\frac{Q_{I0}'}{6} + \frac{Q_{IL}'}{3} \right), \quad Q_S = W \int_0^L Q_I' \left(1 - \frac{x}{L} \right) dx = WL \left(\frac{Q_{I0}'}{3} + \frac{Q_{IL}'}{6} \right)$$

となる。しかしながら、弱反転では以下の如く近似できる。

$$Q_I \approx Q_D \approx Q_S \approx 0$$

空乏領域

空乏領域では反転層電荷は

$$Q_I = 0$$

となる。したがって、空乏領域での空乏層電荷とゲート電荷は、弱反転領域の場合と同じになる。

$$Q_B = -WLC'_{ox}\gamma \left(-\frac{\gamma}{2} + \sqrt{\frac{\gamma^2}{4} + V_{GB} - V_{FB}} \right)$$

$$Q_G = -Q_B - Q_o$$

蓄積領域

蓄積領域では単位面積当りのゲート電荷は

$$Q_G' = C_{ox}' \psi_{ox} = C_{ox}' (V_{GB} - \phi_{MS})$$
$$(\because V_{GB} = \psi_{ox} + \psi_s + \phi_{MS}, \psi_s \approx 0)$$

となる。したがって、全ゲート電荷は、以下になる。

$$Q_G = WLC_{ox}' (V_{GB} - \phi_{MS})$$

蓄積領域では、空乏層電荷を無視できるため、電荷のバランスの式が、

$Q_G + Q_C + Q_o = 0$ となるから、半導体中の電荷は、以下となる。

$$Q_C = -Q_G - Q_o$$

DC条件下での通過時間(強反転)

強反転非飽和 (V_{DS} : 小)

$$\tau = \frac{|Q_I|}{I_{DS}} \approx \frac{C'_{ox} WL (V_{GS} - V_T)}{\mu C'_{ox} (W/L) (V_{GS} - V_T) V_{DS}} = \frac{L^2}{\mu V_{DS}}$$

τ : キャリア(電子)のチャネル通過時間

強反転飽和

$$\tau = \frac{|Q_I|}{I_{DS}} \approx \frac{\frac{2}{3} C'_{ox} WL (V_{GS} - V_T)}{\frac{1}{2} \mu C'_{ox} (W/L) (V_{GS} - V_T)^2 / \alpha} = \frac{4}{3} \tau_0$$

$$\text{但し、} \tau_0 = \frac{\alpha L^2}{\mu (V_{GS} - V_T)}$$

DC条件下での通過時間(弱反転、速度飽和)

弱反転 (但し、 $V_{DS} > 5\phi_t$)

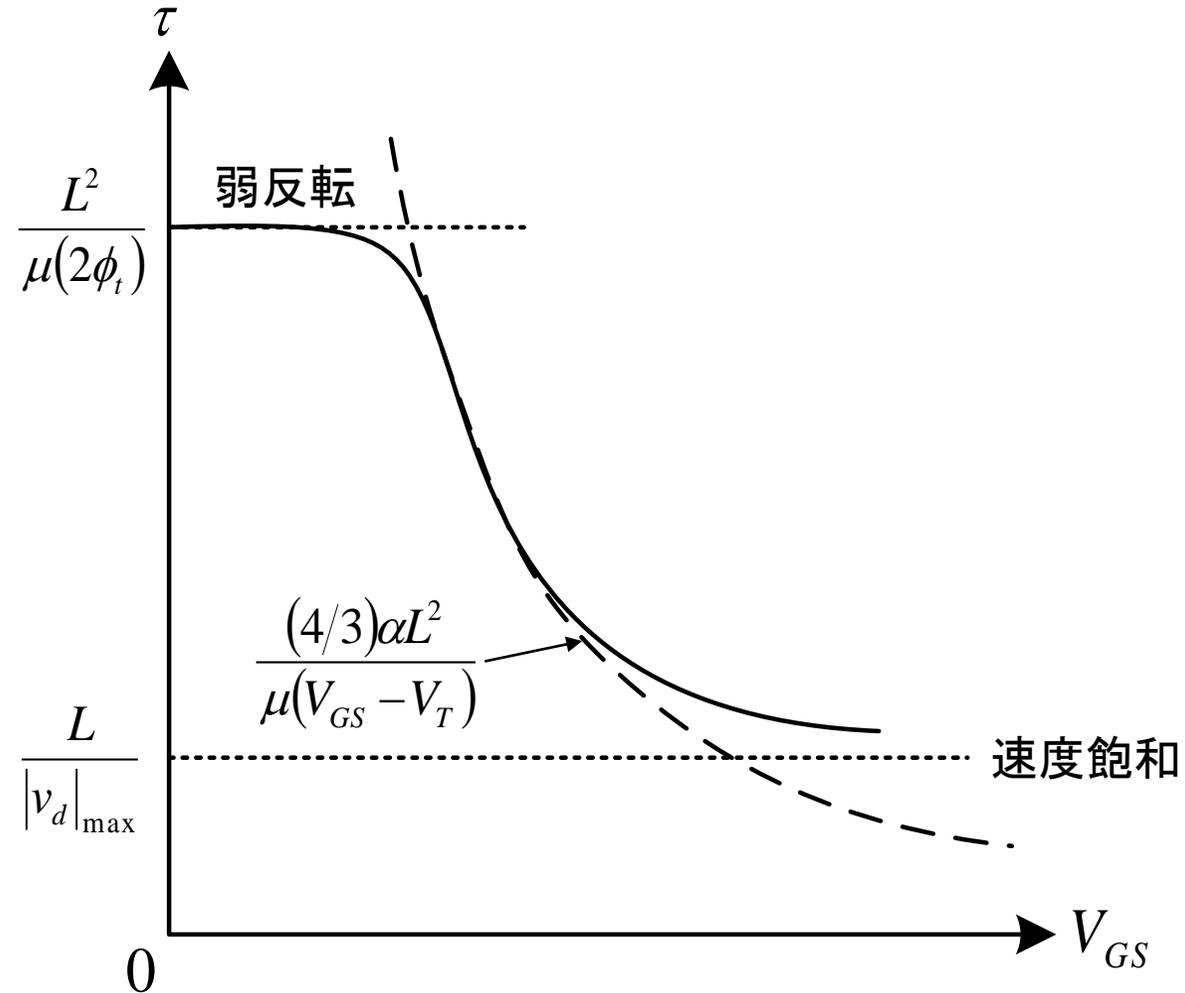
$$\tau = \frac{|Q_I|}{I_{DS}} = \frac{WL \frac{Q'_{I0} + Q'_{IL}}{2}}{\mu(W/L)\phi_t|Q'_{I0}|} \approx \frac{L^2}{\mu(2\phi_t)}$$

$$\text{弱反転電流} : I_{DS} = \frac{W}{L} \mu \phi_t (-Q'_{I0}) (1 - e^{-V_{DS}/\phi_t})$$

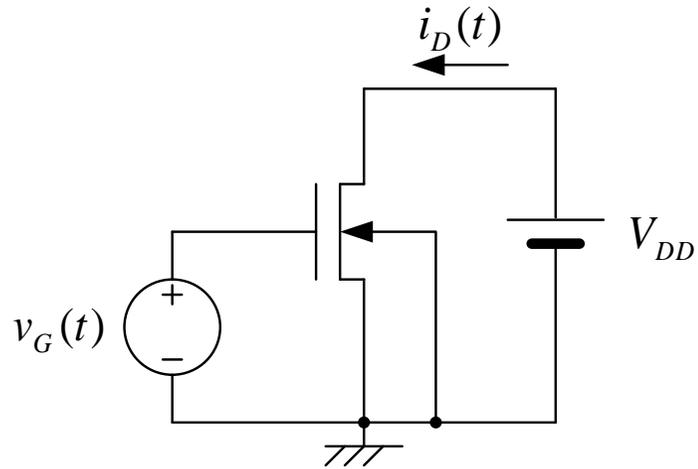
速度飽和

$$\tau > \frac{L}{|v_d|_{\max}}$$

通過時間と V_{GS} との関係



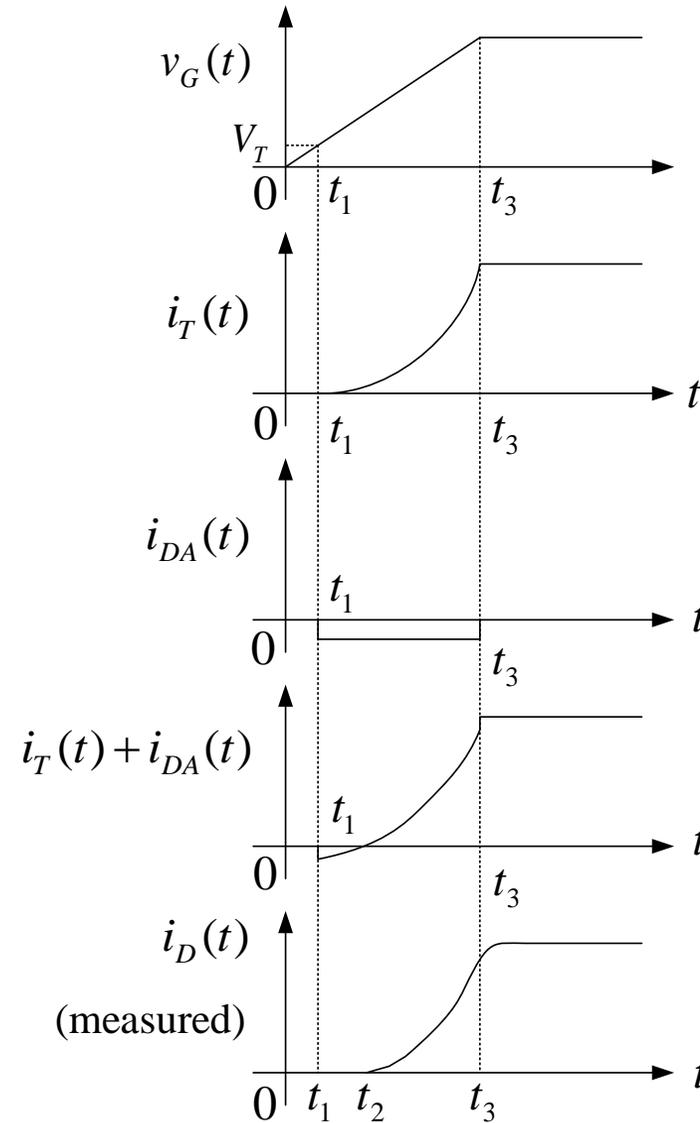
ドレイン電流(成分)の時間変化 (ゲート電圧線形上昇時)



飽和領域

$$i_{DA} = \frac{\partial q_D}{\partial v_G} \frac{dv_G}{dt}$$

$$\frac{\partial q_D}{\partial v_G} = -\frac{4}{15} WLC'_{ox}$$



QSモデルの限界

QSモデルの成立(荒いルール)

$$t_R > 20\tau_0$$

t_R : 波形の上昇時間

$$\tau_0 = \frac{\alpha L^2}{\mu(V_{GS} - V_T)}$$

但し、速度飽和が起こらない場合

NQS (非準定常) 解析

強反転を考える。完全対称強反転モデルから反転層電荷 $q_I'(x,t)$ は、以下となる。

$$q_I'(x,t) = -C_{ox}' \left[v_{GB}(t) - V_{FB} - \phi_0 - v_{CB}(x,t) - \gamma \sqrt{\phi_0 + v_{CB}(x,t)} \right] \quad (\text{直接導出})$$

一方、電流は以下の如く表される。

$$i(x,t) = -\mu W q_I'(x,t) \frac{\partial v_{CB}(x,t)}{\partial x}$$

また、電流連続の式は以下の如くである。

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = W \frac{\partial q_I'(x,t)}{\partial t}$$

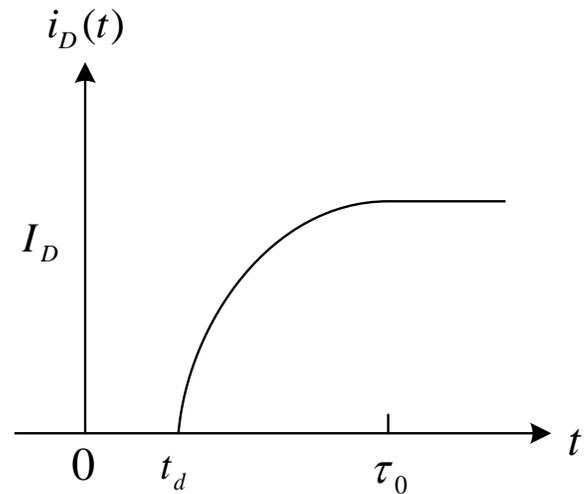
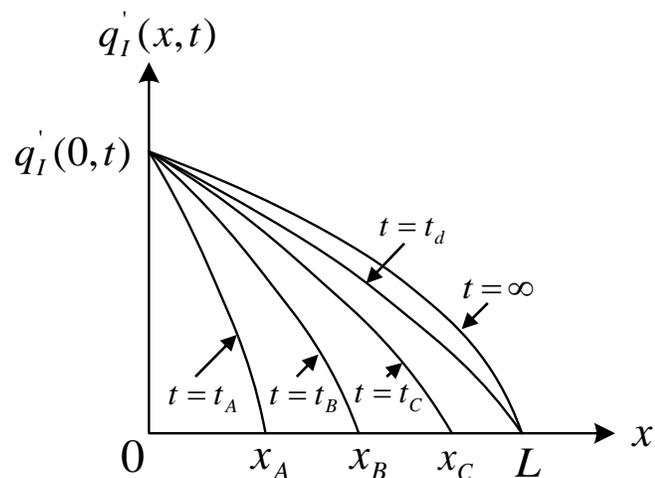
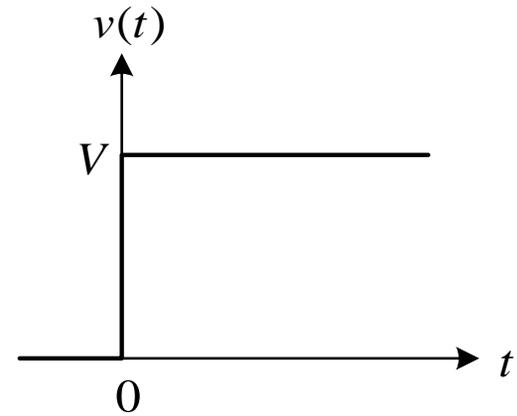
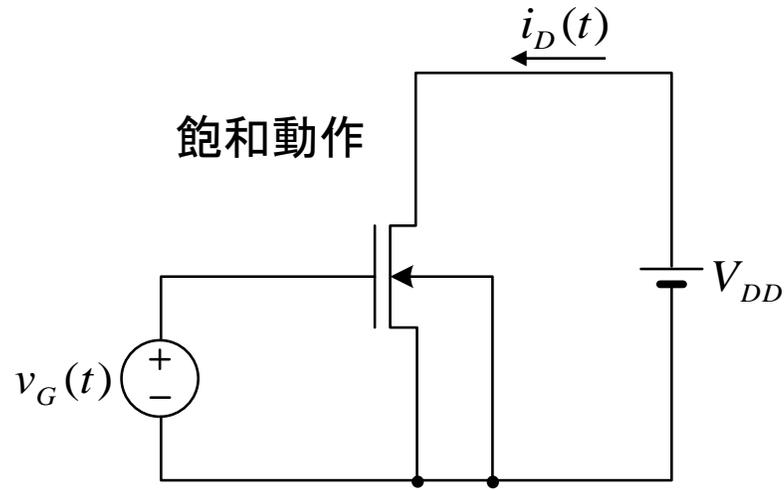
境界条件に以下を用いる。

$$q_I'(0,t) = -C_{ox}' \left[V - V_{FB} - \phi_0 - \gamma \sqrt{\phi_0} \right], \quad q_I'(L,t) = 0 \quad (\text{飽和状態に設定})$$

ここで、 $v_{GB}(t) = V$ 、ソース端で $v_{CB} = v_{SB} = 0$ である。

これらから、 $q_I'(x,t)$ 、 $i(x,t)$ 、 $v_{CB}(x,t)$ を求めることができる。

反転層電荷とドレイン電流の経時変化 (ステップ・ゲート電圧印加)



付録：電流連続の式

Δt 内に右から入る全電荷量: $(i + \Delta i)\Delta t$

Δt 内に左から出で行く全電荷量: $i\Delta t$

Δx 内の電荷の増加量: $(i + \Delta i)\Delta t - i\Delta t = \Delta i\Delta t$

単位面積当りの反転層電荷の増大量 $\Delta q_I'$ は

$$\Delta q_I' = \frac{\Delta i\Delta t}{W\Delta x}$$

となる。これを変形して、

$$\frac{\Delta i}{\Delta x} = W \frac{\Delta q_I'}{\Delta t}$$

となる。微分量に変えると、以下の電流連続の式を得る。

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = W \frac{\partial q_I'(x,t)}{\partial t}$$

