

2端子MOS構造

松田順一

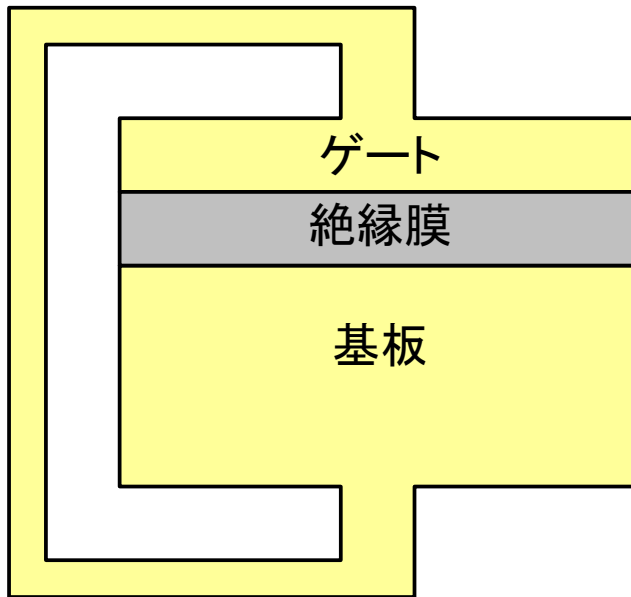
本資料は、以下の本をベースに作られている。

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

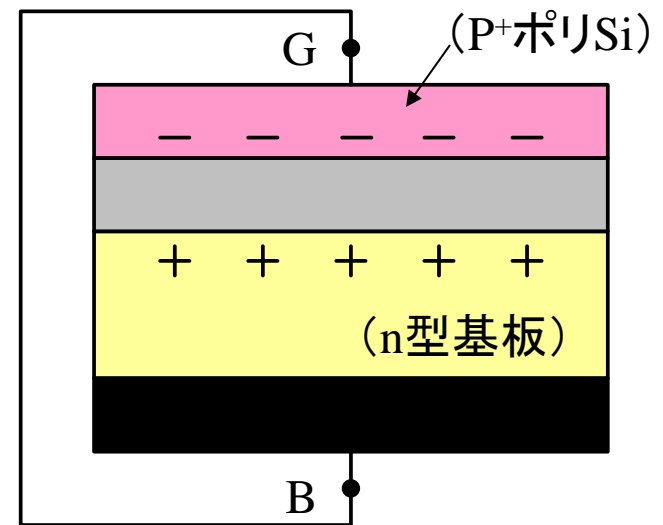
概要

- フラット・バンド電圧
- 電位バランスと電荷バランス
- 表面状態とゲート～基板間電圧
 - フラット・バンド、蓄積、空乏、反転
 - エネルギー・バンド図
- 反転電荷とゲート～基板間電圧
 - 全体的な解析
 - 強反転
 - 弱反転
- 小信号容量
- フラット・バンド電圧と基板濃度の導出

フラット・バンド電圧説明(1)



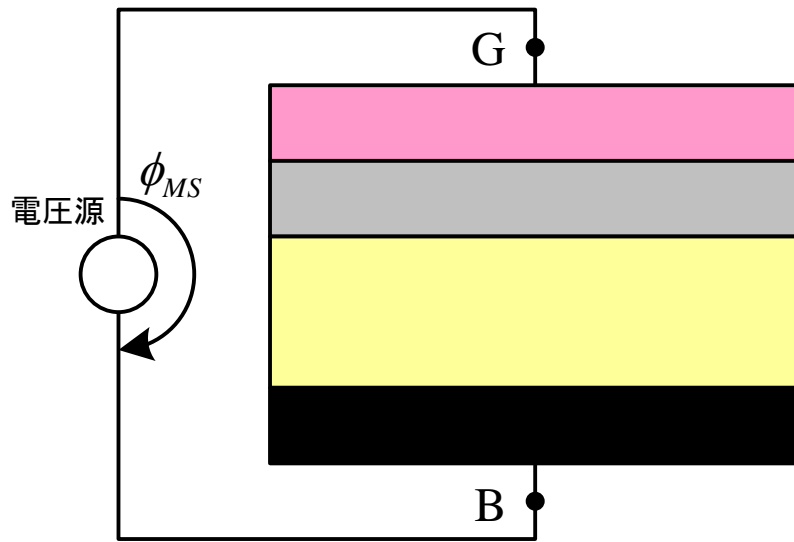
(1)ゲートと基板は同一材料



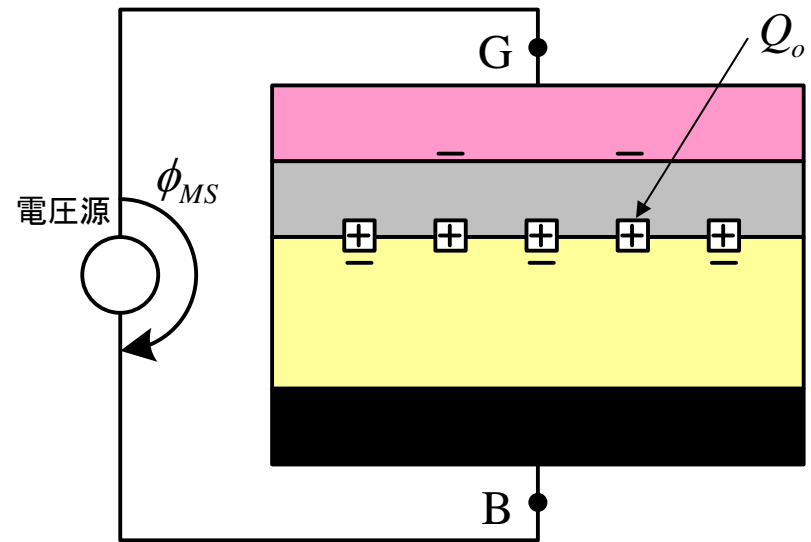
(2)ゲートと基板は異種材料

仕事関数差によりゲートと
基板側にそれぞれ電荷発生

フラット・バンド電圧説明(2)



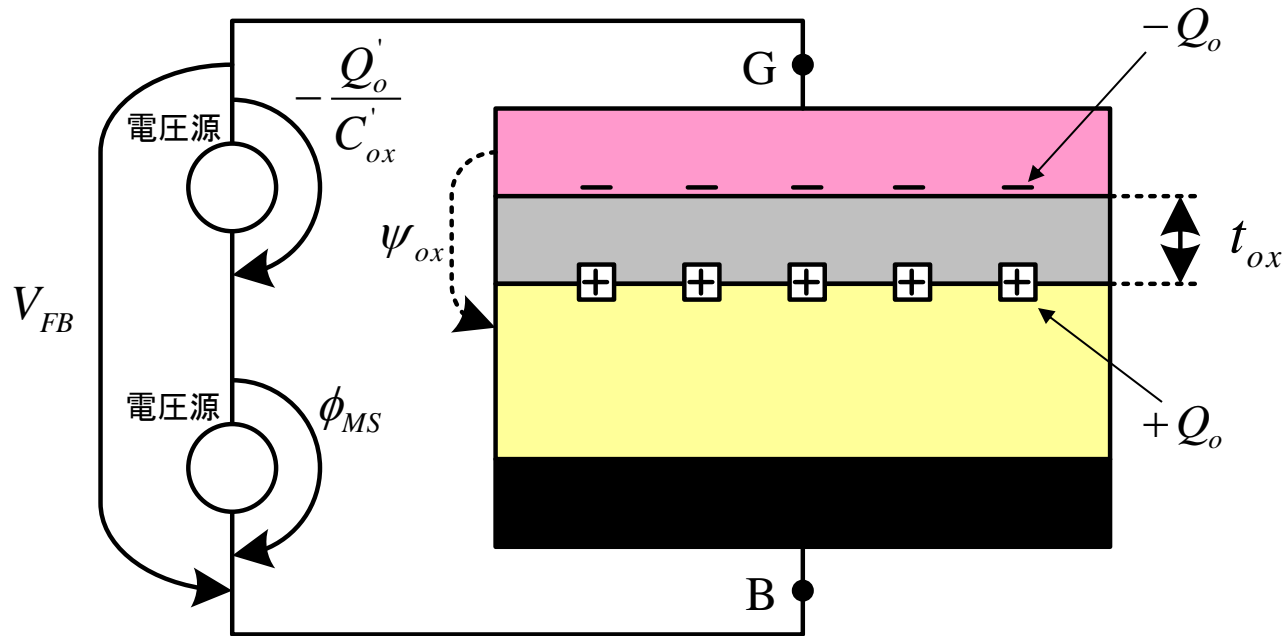
(3) 表面電荷がゼロになる
ように外部電圧 ϕ_{MS} 印加



(4) 界面電荷 Q_0 の影響

$$\phi_{MS} = \phi_{Bulk_material} - \phi_{gate_material}$$

フラット・バンド電圧説明(3)



(5) 界面電荷の影響を打消す外部電圧印加

$$\psi_{ox} = -Q'_0 / C'_{ox}, \quad C'_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox}$$

フラット・バンド電圧 (数式表現)

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_o'}{C'_{ox}}$$

n^+ ポリシリコンゲート

$$\phi_{MS} = -\phi_F - 0.56V$$

p^+ ポリシリコンゲート

$$\phi_{MS} = -\phi_F + 0.56V$$

V_{FB} : フラットバンド電圧

ϕ_{MS} : 仕事関数差電位

$$\phi_{MS} = \phi_{Bulk_material} - \phi_{gate_material}$$

$$\left(= \frac{W_M - W_S}{q} \right)$$

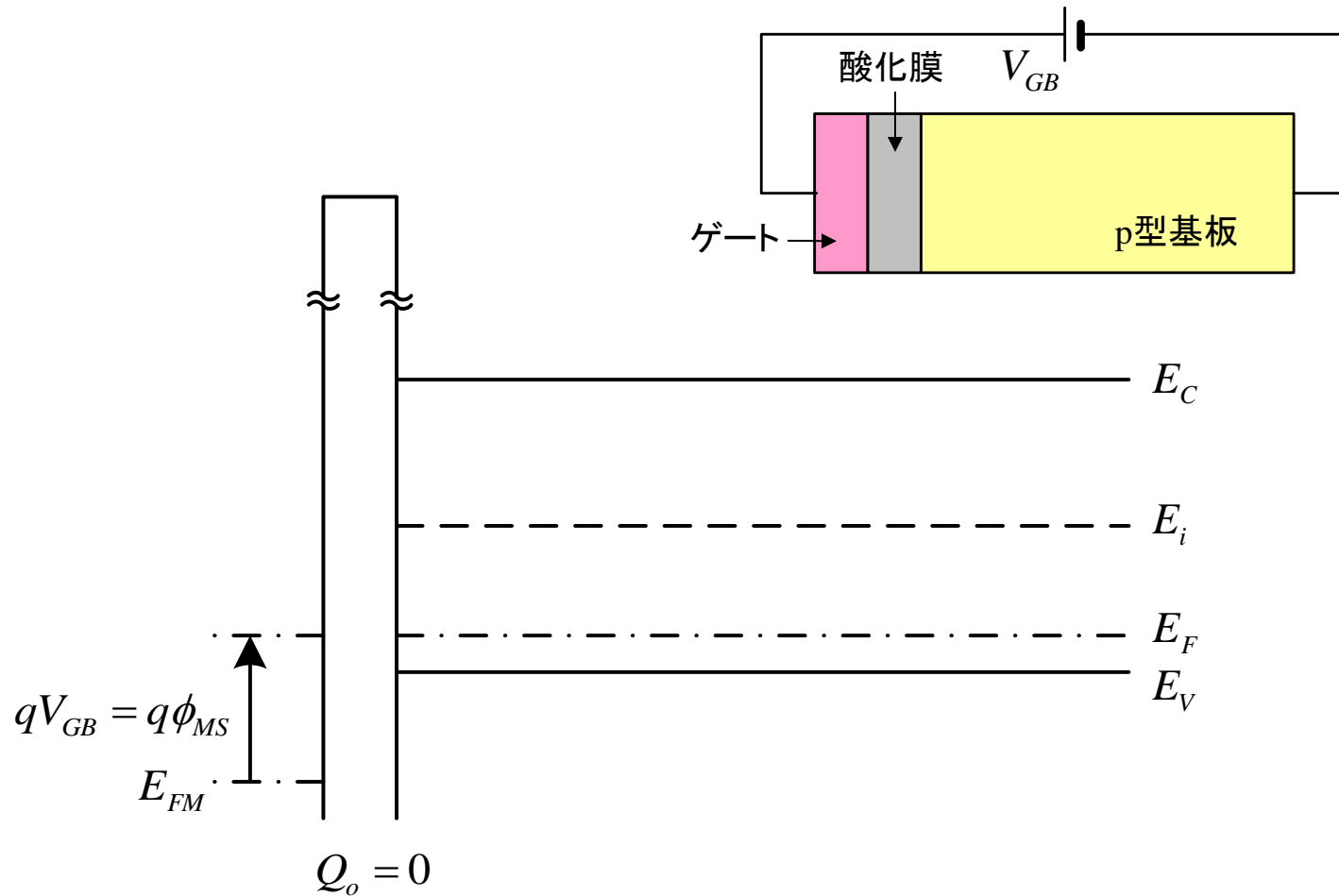
Q_o' : 単位面積当りの実効界面電荷

C'_{ox} : 単位面積当りの酸化膜容量

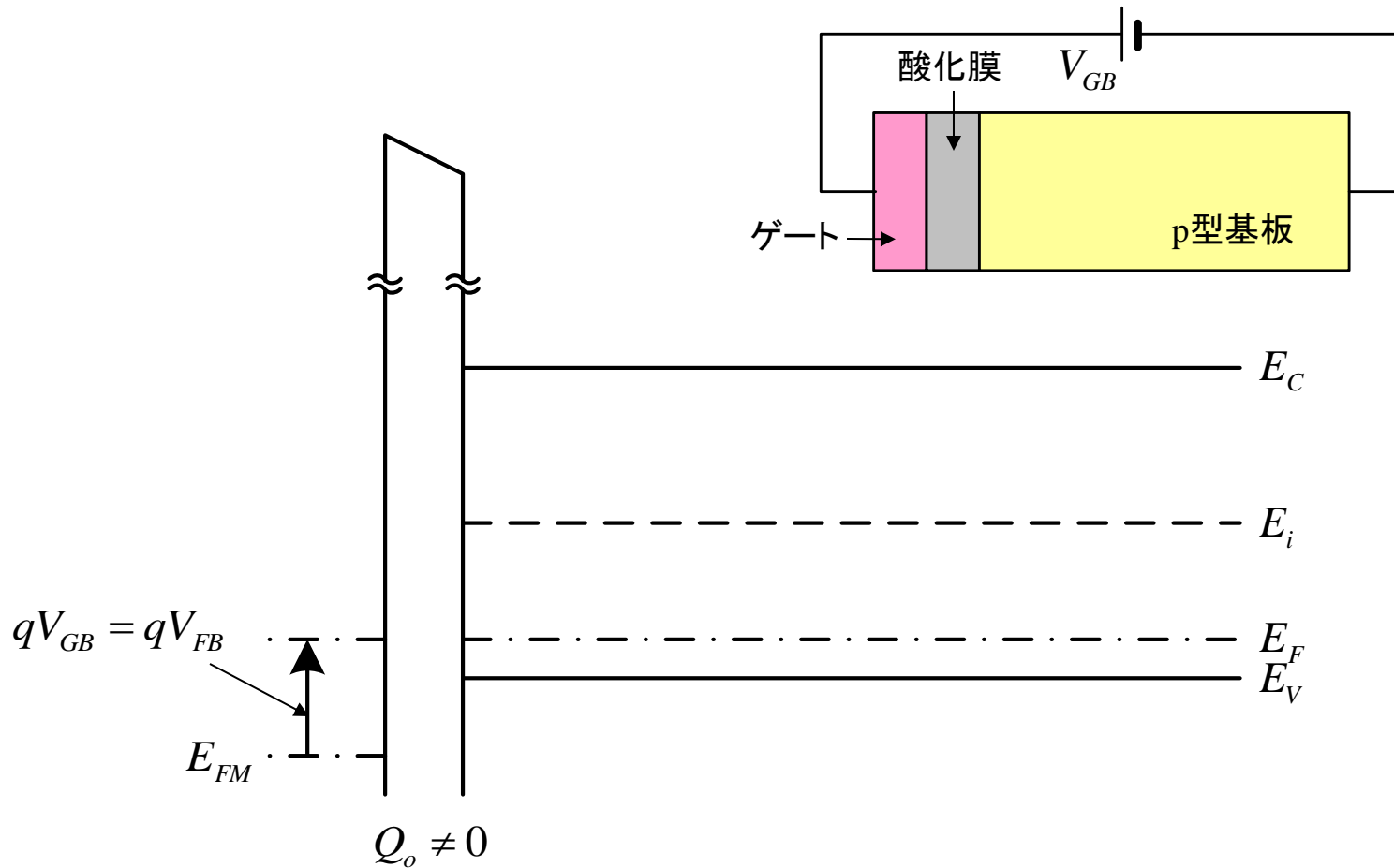
実効界面電荷 Q_o

- 固定電荷
 - 酸化時にSi-SiO₂界面に形成
- 酸化膜中のトラップ電荷
 - 放射線、光エミッション、キャリア注入に起因
- 可動イオン(Na)電荷
 - 工程での環境に起因
- 界面トラップ電荷
 - 界面での欠陥に起因
 - 基板中のキャリアと電荷の交換あり

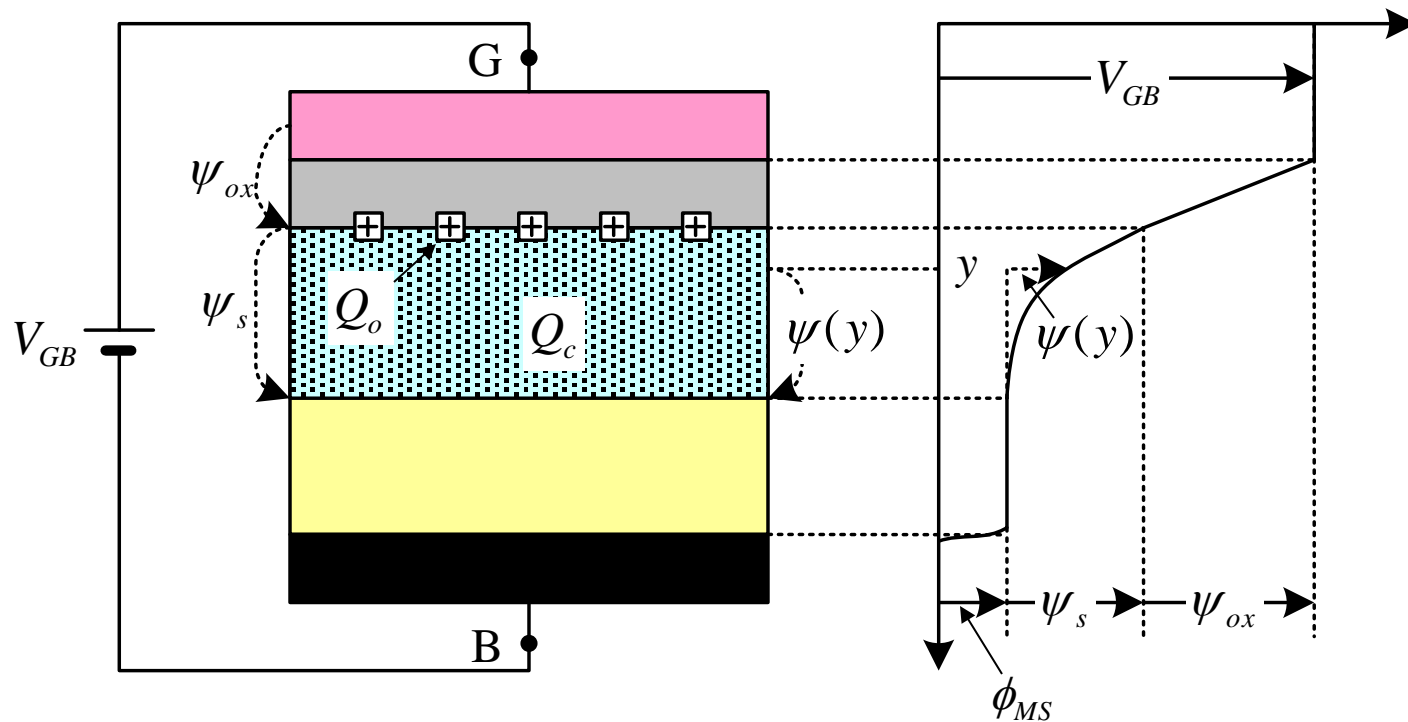
フラット・バンドの説明図(1)



フラット・バンドの説明図(2)



電位バランス



$$V_{GB} = \psi_{ox} + \psi_s + \phi_{MS}$$

電位バランス(数式表現)

ゲート～基板間電圧

$$V_{GB} = \psi_{ox} + \psi_s + \phi_{MS}$$

電圧変化のある場合

$$\Delta V_{GB} = \Delta \psi_{ox} + \Delta \psi_s$$

電荷中性

$$Q_G' + Q_o' + Q_C' = 0$$

電荷変化のある場合

$$\Delta Q_G' + \Delta Q_C' = 0$$

(注) ここでは、 Q_o' を固定して考える。

実際には、界面準位により Q_o' は変化する。

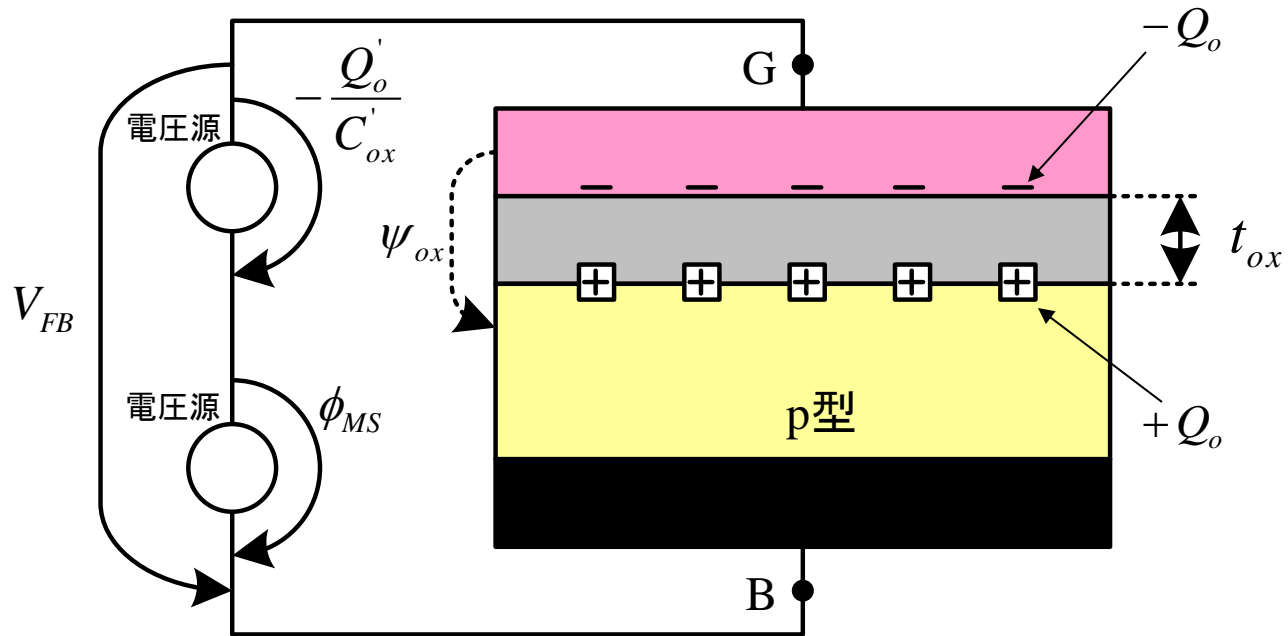
Q_G' : 単位面積当り

ゲート上電荷

Q_C' : 単位面積当り

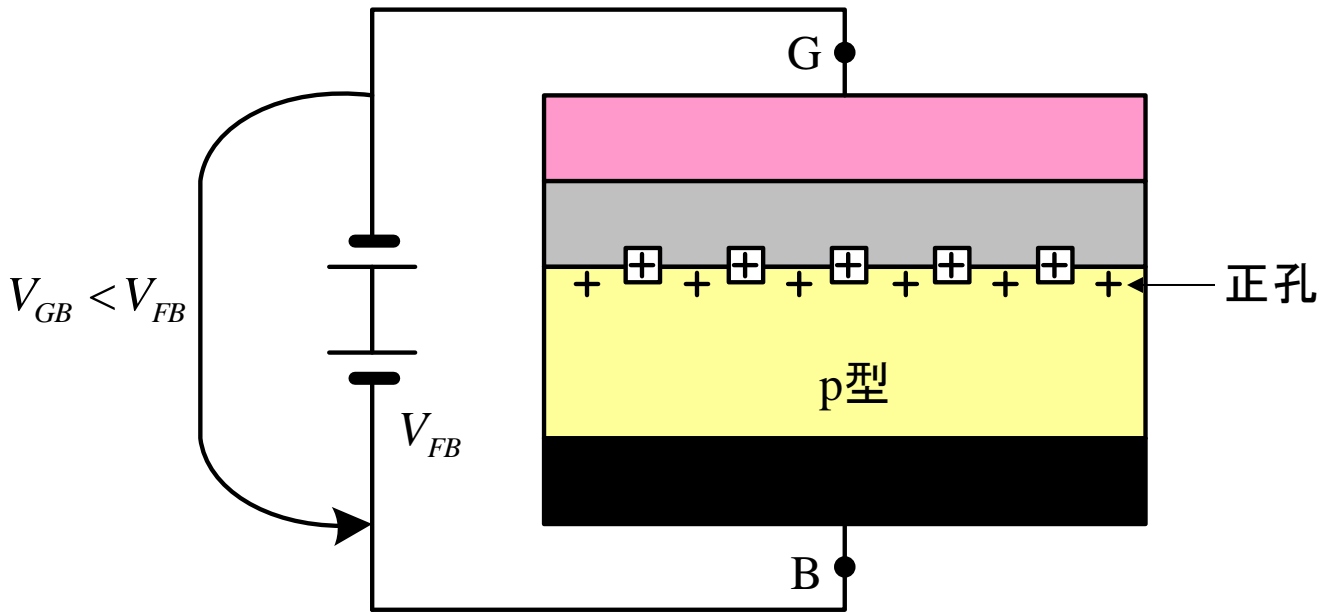
基板内電荷

フラット・バンド状態



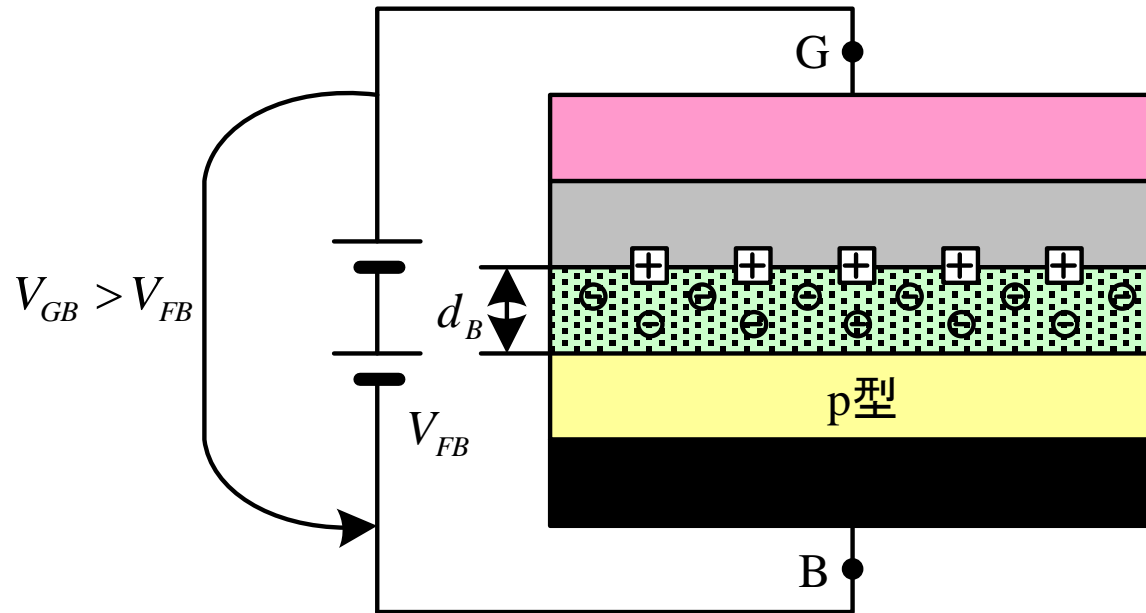
$$V_{GB} = V_{FB}, \quad Q'_C = 0, \quad \psi_s = 0$$

蓄積狀態



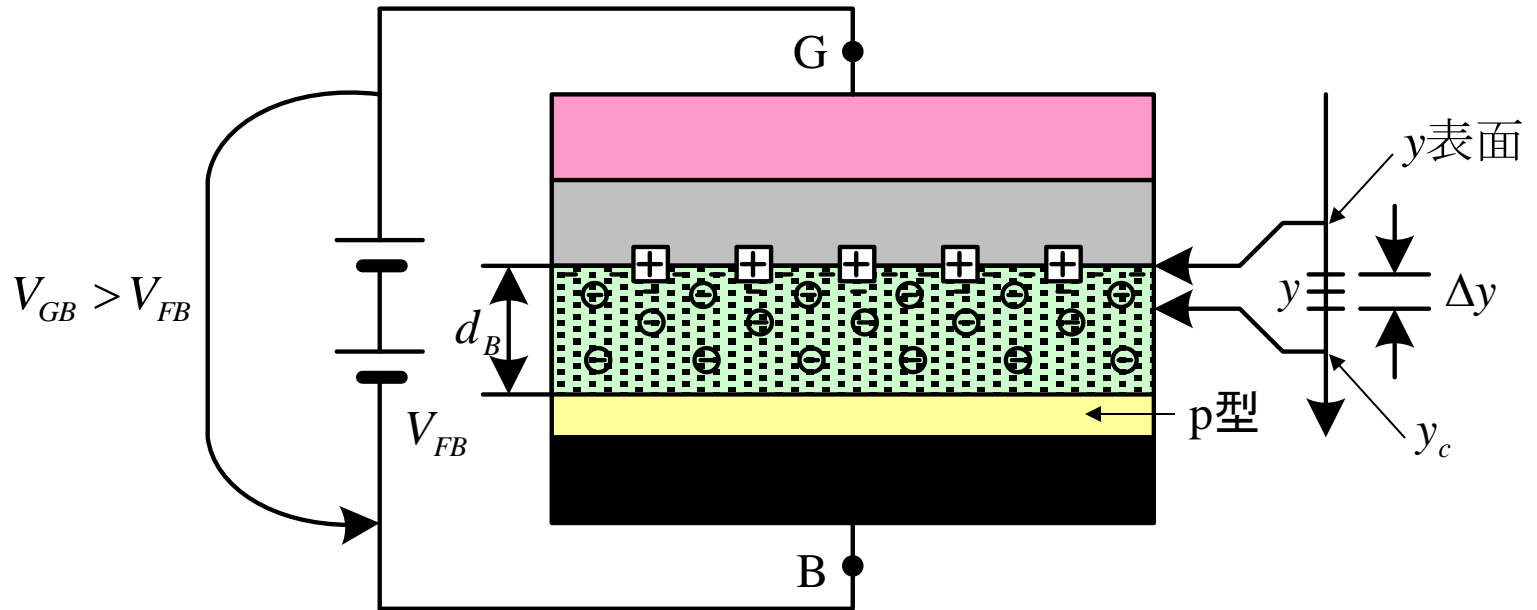
$$V_{GB} < V_{FB}, \quad Q'_C > 0, \quad \psi_s < 0$$

空乏狀態



$$V_{GB} > V_{FB}, \quad Q'_C < 0, \quad \psi_s > 0$$

反轉狀態



$$V_{GB} > V_{FB}, \quad Q'_C < 0, \quad \psi_s > 0$$

表面電荷

表面電荷（電子）密度

$$\begin{aligned}n_{surface} &= n_0 e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} \\ &= n_i e^{\frac{\psi_s - \phi_F}{\phi_t}} \\ &= p_0 e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}} \\ &\cong N_A e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}\end{aligned}$$

平衡狀態（p型基板）

$$p_0 \cong N_A, \quad n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

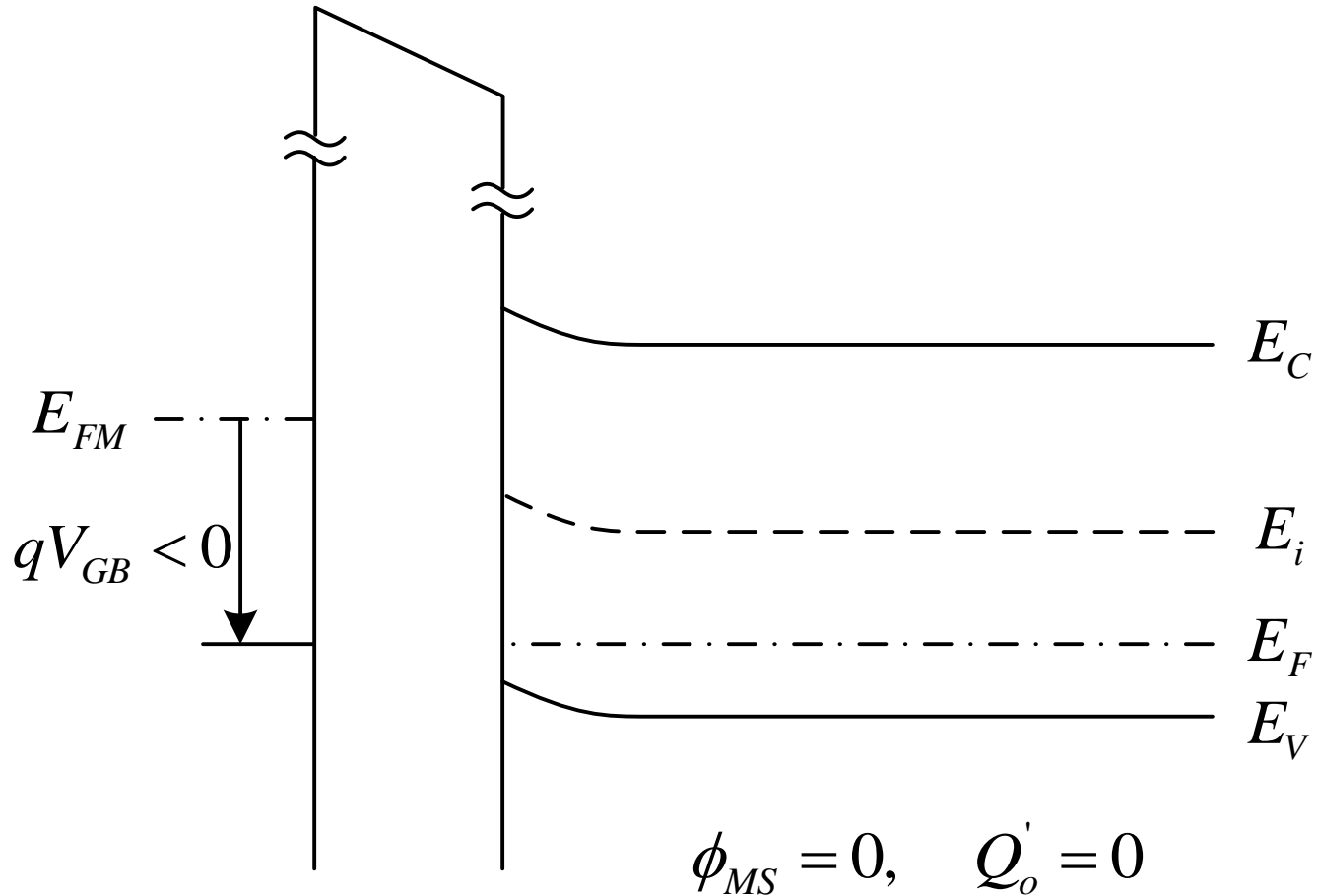
$$\phi_F = \phi_t \ln\left(\frac{n_i}{n_0}\right)$$

$$\Rightarrow n_0 = n_i \exp\left(-\frac{\phi_F}{\phi_t}\right)$$

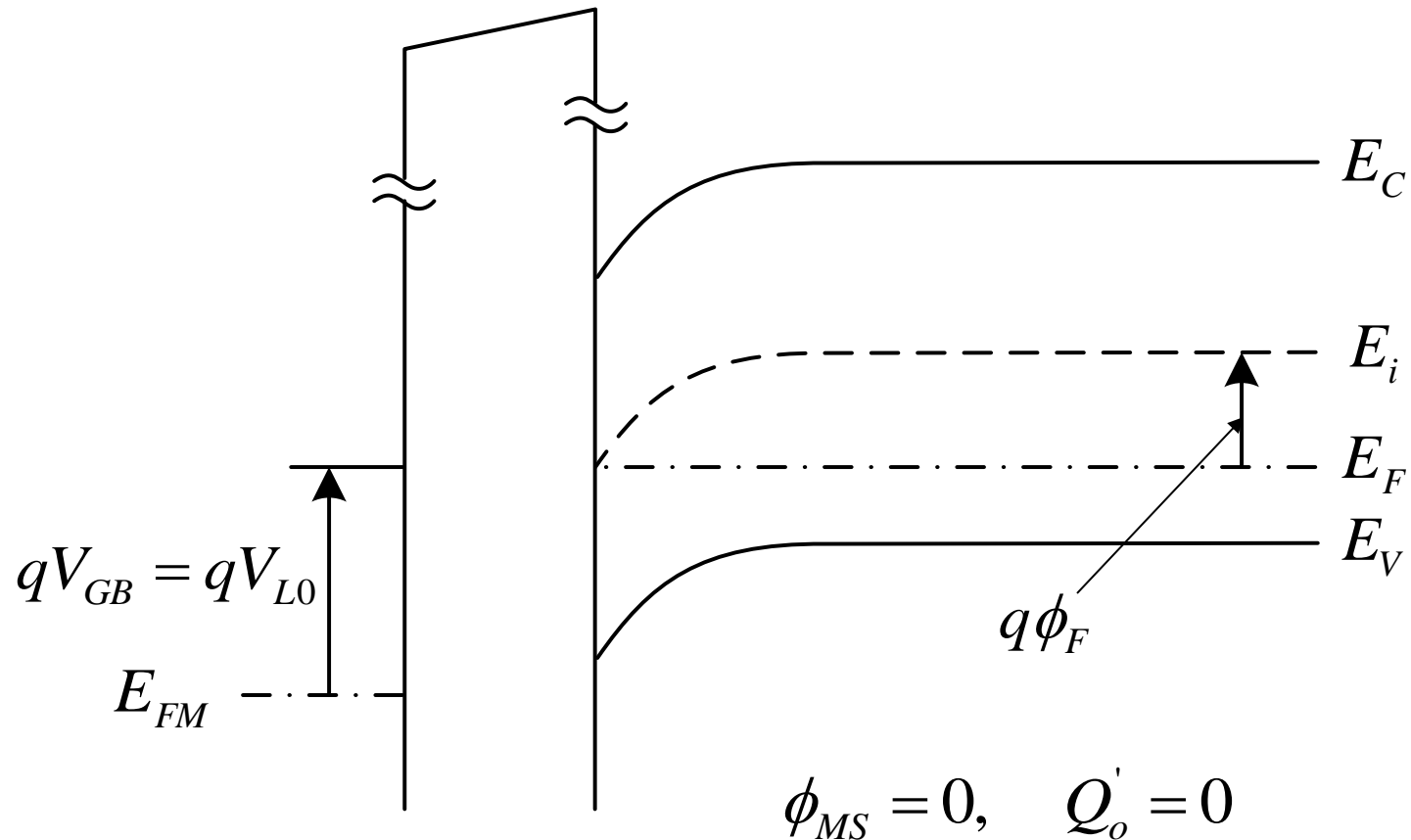
$$\phi_F = \phi_t \ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right)$$

$$\Rightarrow n_i = p_0 \exp\left(-\frac{\phi_F}{\phi_t}\right)$$

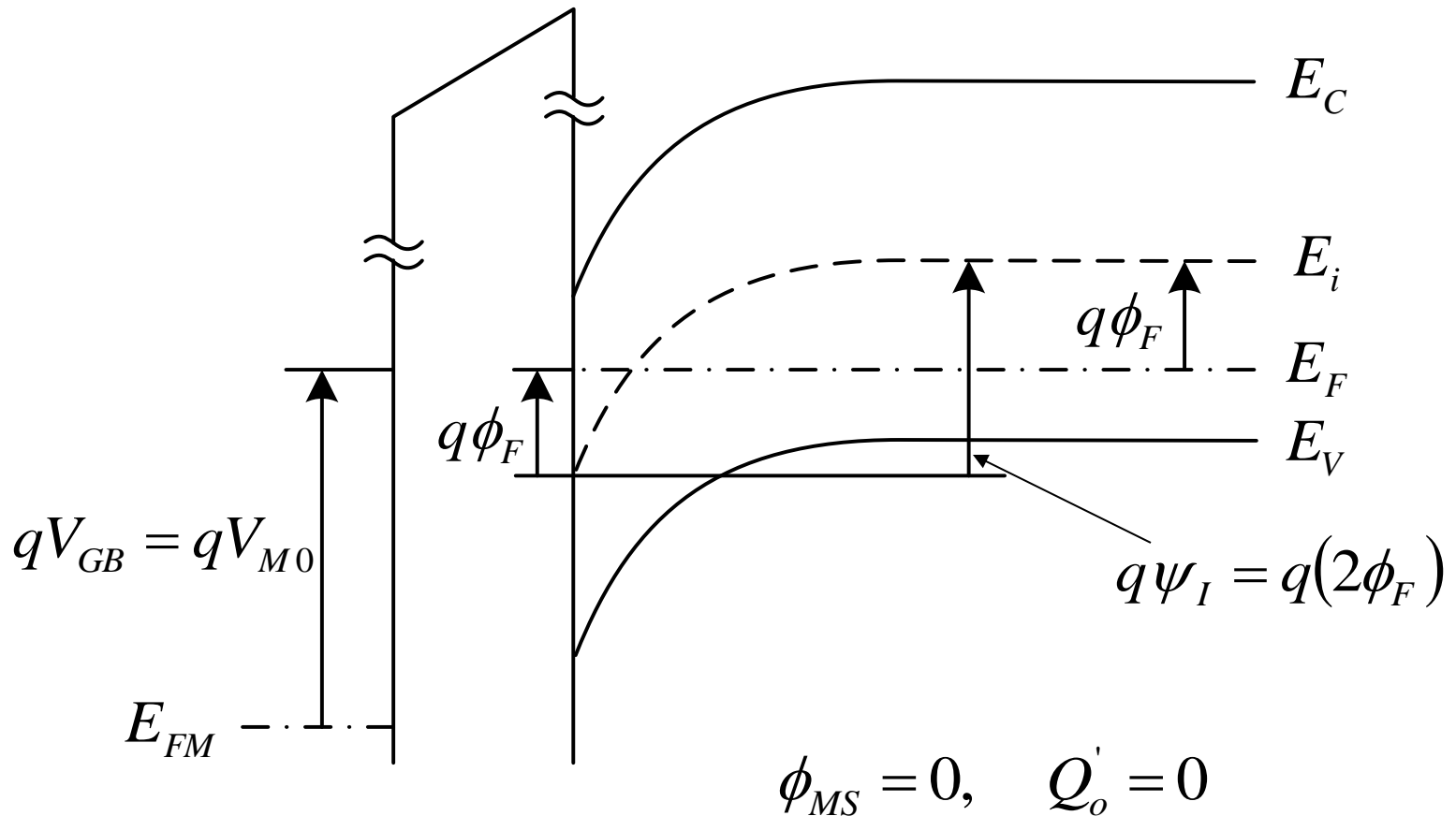
2端子MOS構造のエネルギー・バンド図 (蓄積状態)



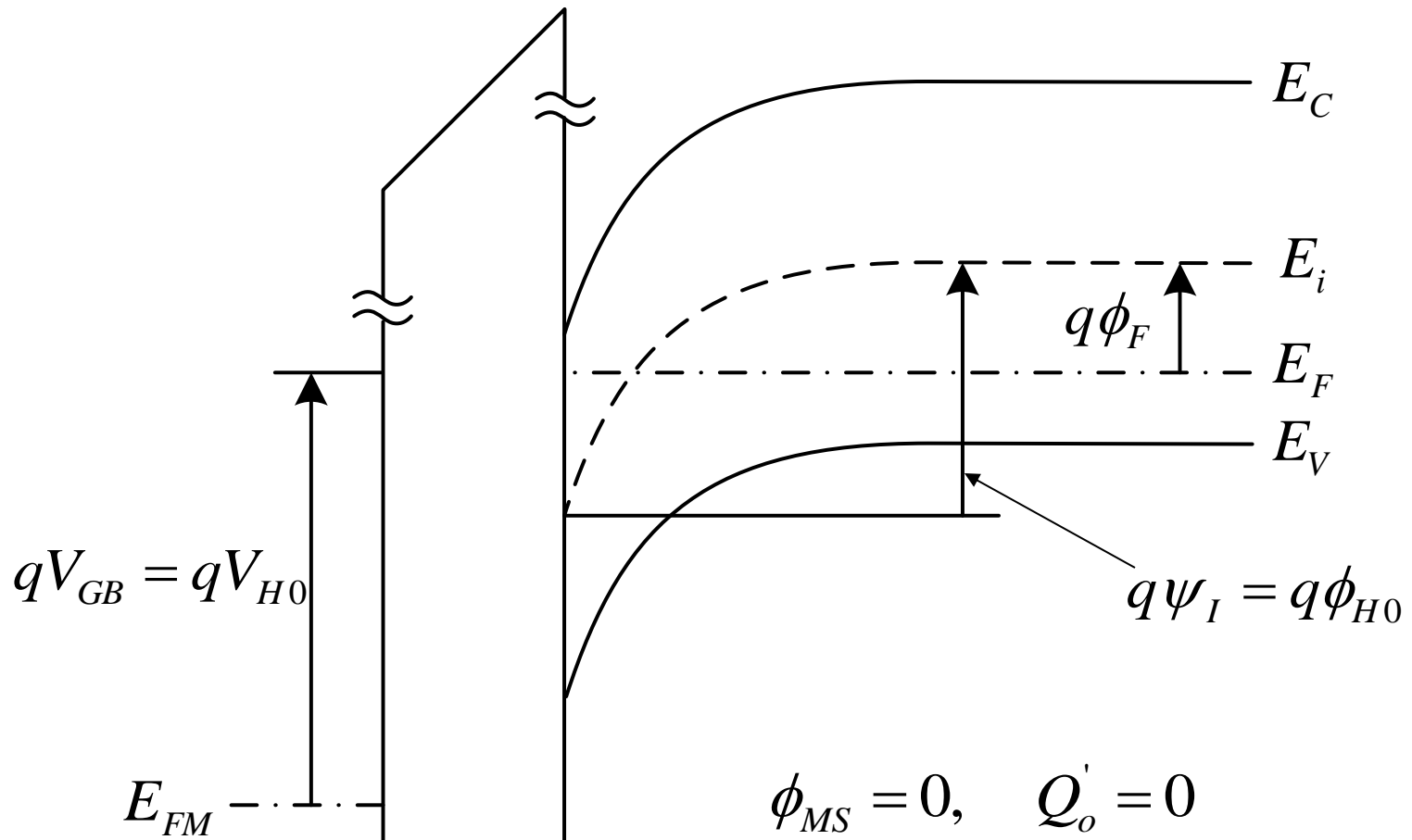
2端子MOS構造のエネルギー・バンド図 (弱反転開始)



2端子MOS構造のエネルギー・バンド図 (中反転開始)



2端子MOS構造のエネルギー・バンド図 (強反転開始)



全体的な解析(ポアソンの式)

・電荷密度

$$\rho(y) = q[p(y) - n(y) - N_A]$$

$$n(y) = n_0 \exp\left(\frac{\psi(y)}{\phi_t}\right)$$

$$p(y) = p_0 \exp\left(-\frac{\psi(y)}{\phi_t}\right)$$

$$p_0 - n_0 = N_A$$

p基板
深さ方向:y

・ポアソンの式

$$\frac{d^2\psi}{dy^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} \left[p_0 \left(e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 \right) - n_0 \left(e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 \right) \right]$$

ポアソンの式の解(1)

$$N_A \gg n_i, \quad p_0 \cong N_A, \quad n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_A} = N_A e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}}$$

とするとポアソンの式は、以下の如くになる。

$$\frac{d^2\psi}{dy^2} = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} \left[e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 - e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 \right) \right]$$

両辺に $2\frac{d\psi}{dy}$ をかけると左辺は、

$$2\frac{d\psi}{dy} \frac{d^2\psi}{dy^2} = \frac{d}{dy} \left(\frac{d\psi}{dy} \right)^2$$

となる。したがってポアソンの式は、以下の如くになる。

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{d\psi}{dy} \right)^2 = -\frac{2qN_A}{\epsilon_s} \left[e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 - e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 \right) \right] \frac{d\psi}{dy}$$

ポアソンの式の解(2)

$y: \infty \rightarrow y$ まで積分, 但し $y = \infty$ で $\psi = 0, \frac{d\psi}{dy} = 0$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\psi}{dy}\right)^2 &= -\frac{2qN_A}{\epsilon_s} \int_0^{\psi} \left[e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 - e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t} \frac{\psi(y)}{\phi_t}} (e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1) \right] d\psi \\ &= \frac{2qN_A}{\epsilon_s} \left[\phi_t e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} + \psi - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t} \frac{\psi(y)}{\phi_t}} (\phi_t e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - \psi - \phi_t) \right] \end{aligned}$$

したがって電界 $E(y) = -\frac{d\psi}{dy}$ は

$$E(y) = \pm \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{\epsilon_s} \sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} + \psi - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t} \frac{\psi(y)}{\phi_t}} (\phi_t e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - \psi - \phi_t)}$$

ここで $+: \psi > 0, -: \psi < 0$

半導体中の全電荷と容量

単位面積当りの半導体電荷 Q'_C は、以下の如くになる。

$$Q'_C = -\varepsilon_s E_{surface}, \quad \psi(y) = \psi_s$$

$$Q'_C = \mp \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + \psi_s - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(\phi_t e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - \psi_s - \phi_t \right)}$$

また、 Q'_C に対する容量 $C'_c \equiv -\frac{dQ'_C}{d\psi_s}$ は

$$C'_c = \pm \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \left\{ \frac{1 - e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - 1 \right)}{2 \sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + \psi_s - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(\phi_t e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - \psi_s - \phi_t \right)}} \right\}$$

となる。

反転領域(反転層電荷)

$\psi_s \geq \phi_F$, p 基板の場合

$$Q'_C = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}$$

$$Q'_B = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \sqrt{\psi_s}$$

となる。ここで、

$$Q'_C = Q'_I + Q'_B$$

から

Q'_I : 単位面積当りの反転層電荷

Q'_B : 単位面積当りの空乏層電荷

$$Q'_I = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \left(\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}} - \sqrt{\psi_s} \right)$$

となる。

反転領域(表面電位とゲート電圧: 1)

電圧及び電荷の関係

$$V_{GB} = \psi_{ox} + \psi_s + \phi_{MS}$$

$$Q'_G + Q'_o + Q'_I + Q'_B = 0$$

$$Q'_G = C'_{ox} \psi_{ox}$$

$$Q'_I = Q'_I(\psi_s)$$

$$Q'_B = Q'_B(\psi_s)$$

ゲート～基板間電圧と表面電位

$$V_{GB} = -\frac{1}{C'_{ox}} [Q'_o + Q'_I(\psi_s) + Q'_B(\psi_s)] + \psi_s + \phi_{MS}$$

$$= \phi_{MS} - \frac{Q'_o}{C'_{ox}} + \psi_s - \frac{Q'_I(\psi_s) + Q'_B(\psi_s)}{C'_{ox}}$$

$$= V_{FB} + \psi_s - \frac{Q'_I(\psi_s) + Q'_B(\psi_s)}{C'_{ox}}$$

反転領域(表面電位とゲート電圧:2)

$$V_{GB} = V_{FB} + \psi_s + \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{C'_{ox}} \sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}$$
$$= V_{FB} + \psi_s + \gamma \sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}$$

ここで、

$\psi_s = \phi_F$ の場合、 $V_{GB} \Rightarrow V_{L0}$

$$V_{L0} = V_{FB} + \phi_F + \gamma \sqrt{\phi_F}$$

$\psi_s = 2\phi_F$ の場合、 $V_{GB} \Rightarrow V_{M0}$

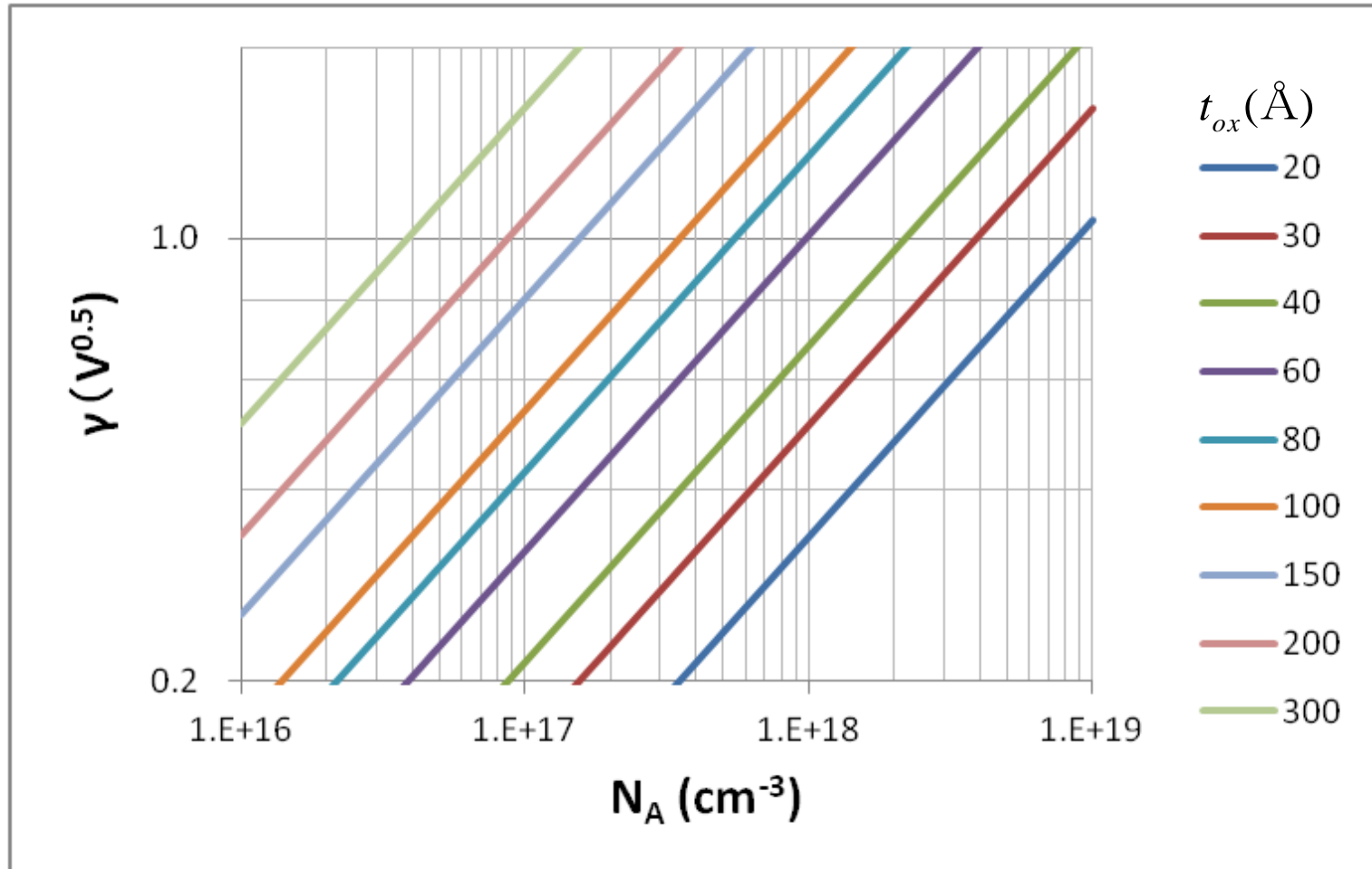
$$V_{M0} = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma \sqrt{2\phi_F}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{C'_{ox}}$$

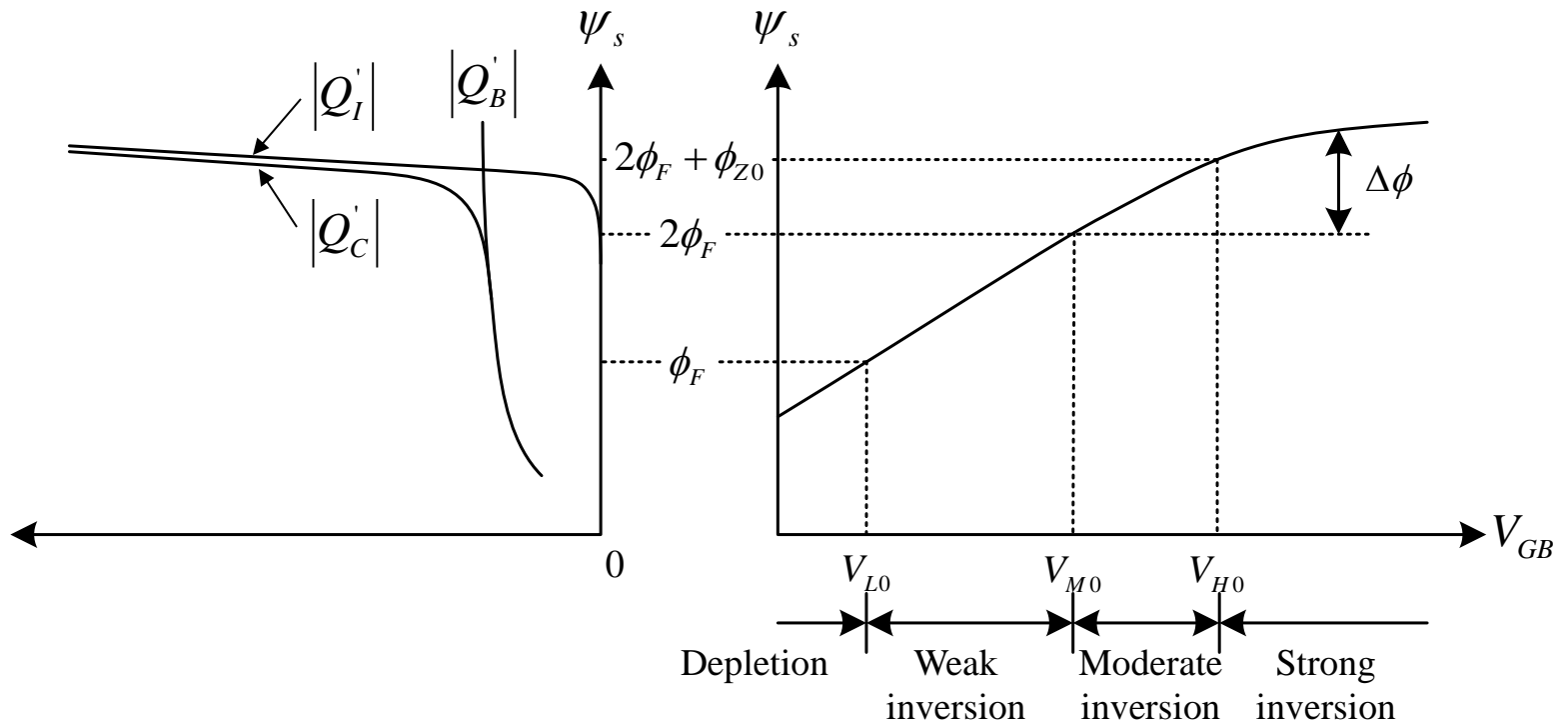
V_{L0} : 弱反転開始電圧

V_{M0} : 中反転開始電圧

基板バイアス係数



表面電位とゲート基板間電圧 及び電荷と表面電位



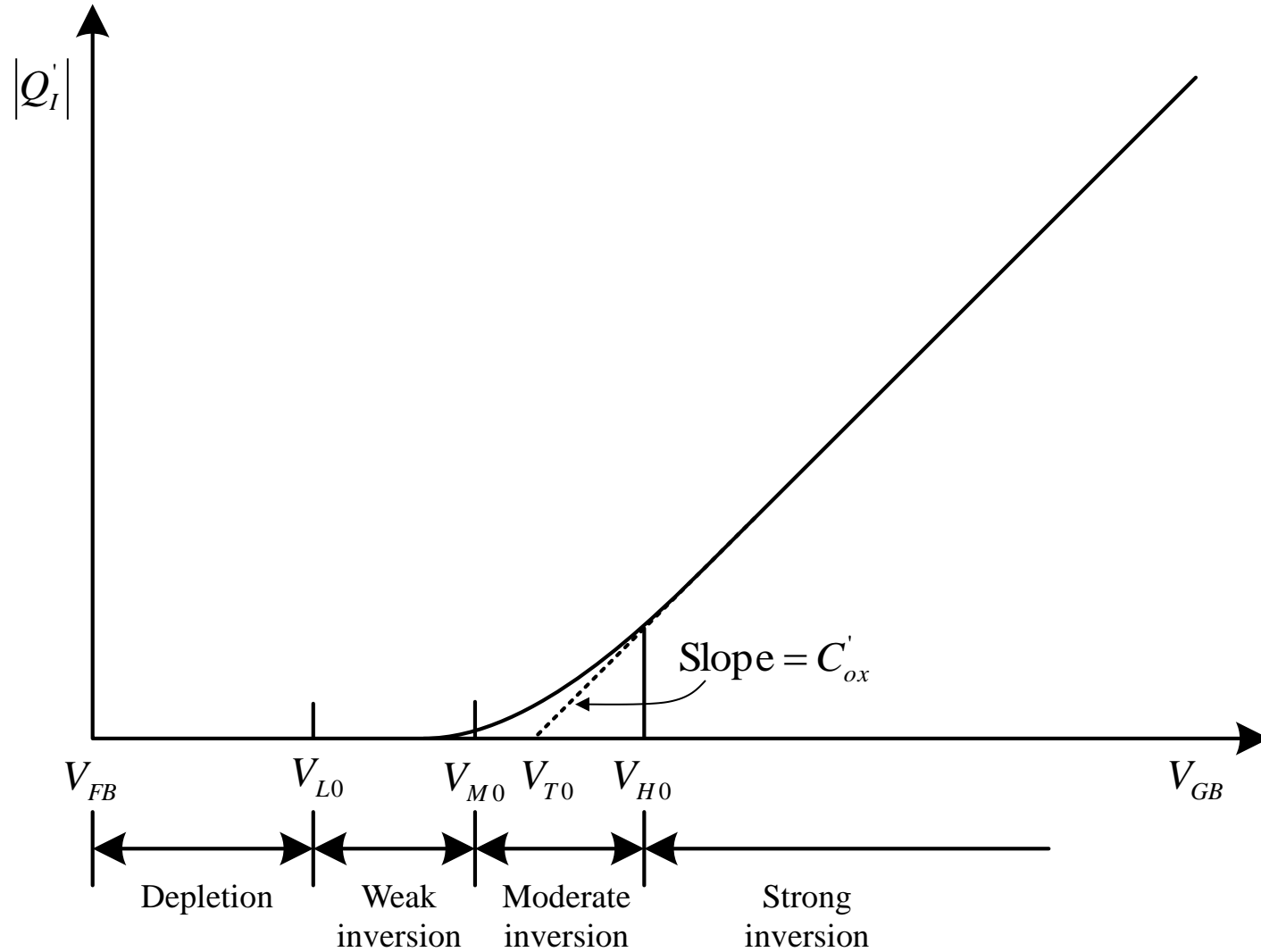
反転領域(反転層電荷とゲート電圧)

$$\begin{aligned} Q_I' &= -C_{ox}'\psi_{ox} - Q_o' - Q_B' \\ &= -C_{ox}' \left(V_{GB} - \psi_s - \phi_{MS} + \frac{Q_o' + Q_B'}{C_{ox}'} \right) \\ &= -C_{ox}' \left(V_{GB} - V_{FB} - \psi_s - \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{C_{ox}'} \sqrt{\psi_s} \right) \\ &= -C_{ox}' \left(V_{GB} - V_{FB} - \psi_s - \gamma \sqrt{\psi_s} \right) \end{aligned}$$

$$\because V_{GB} = \psi_{ox} + \psi_s + \phi_{MS}$$

$$\because Q_B' = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \sqrt{\psi_s}$$

反転層電荷とゲート～基板間電圧



強反転領域の電荷

表面電位は、実効的に一定

$$\psi_s \cong \phi_0$$

$$\phi_0 = 2\phi_F + \Delta\phi$$

この場合の反転層電荷は

$$\begin{aligned} Q_I' &= -C_{ox}' \left(V_{GB} - V_{FB} - \phi_0 - \gamma \sqrt{\phi_0} \right) \\ &= -C_{ox}' \left(V_{GB} - V_{T0} \right) \end{aligned}$$

となる。ここで

$$V_{T0} = V_{FB} + \phi_0 + \gamma \sqrt{\phi_0}$$

である。

弱反転領域 (反転電荷と表面電位)

反転領域の電荷は

$$Q_I' = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \left(\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}} - \sqrt{\psi_s} \right)$$

弱反転領域では、 $\psi_s \leq 2\phi_F$ であるから、

$\phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t} = \xi$ とおくと、 $\xi \ll \psi_s$ となるため

$$\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}} = \sqrt{\psi_s + \xi} \cong \sqrt{\psi_s} \left(1 + \frac{\xi}{2\psi_s} \right)$$

したがって、

$$Q_I' \cong -\frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{2\sqrt{\psi_s}} \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}$$

弱反転領域（反転電荷とゲート電圧：1）

弱反転領域では、 $\psi_s \leq 2\phi_F$ であるから

$$\begin{aligned} V_{GB} &= V_{FB} + \psi_s + \gamma \sqrt{\psi_s + \phi_t} e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t} \\ &\cong V_{FB} + \psi_s + \gamma \sqrt{\psi_s} \end{aligned}$$

となる。 $\psi_s \cong \psi_{sa}$ として、上式から ψ_{sa} を解くと

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

となる。したがって、 ψ_{sa} は V_{GB} の関数になり、

$$Q_I' = -\frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{2\sqrt{\psi_{sa}(V_{GB})}} \phi_t e^{[\psi_{sa}(V_{GB}) - 2\phi_F]/\phi_t}$$

となる。

弱反転領域（反転電荷とゲート電圧：2）

ここで、 $\sqrt{\psi_{sa}(V_{GB})} \cong \sqrt{2\phi_F}$ とすると、

$$Q_I' = -\frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{2\sqrt{2\phi_F}} \phi_t e^{[\psi_{sa}(V_{GB}) - 2\phi_F]/\phi_t}$$

となる。ここで、

$$n = \left(\frac{d\psi_{sa}}{dV_{GB}} \right)^{-1} = 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_{sa}}}$$

$$n|_{\psi_{sa}=2\phi_F} \cong 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_F}} = n_0 \quad (\text{一定})$$

である。

弱反転領域(反転電荷とゲート電圧:3)

したがって、

$$\psi_{sa} - 2\phi_F = \frac{1}{n_0} (V_{GB} - V_{M0})$$

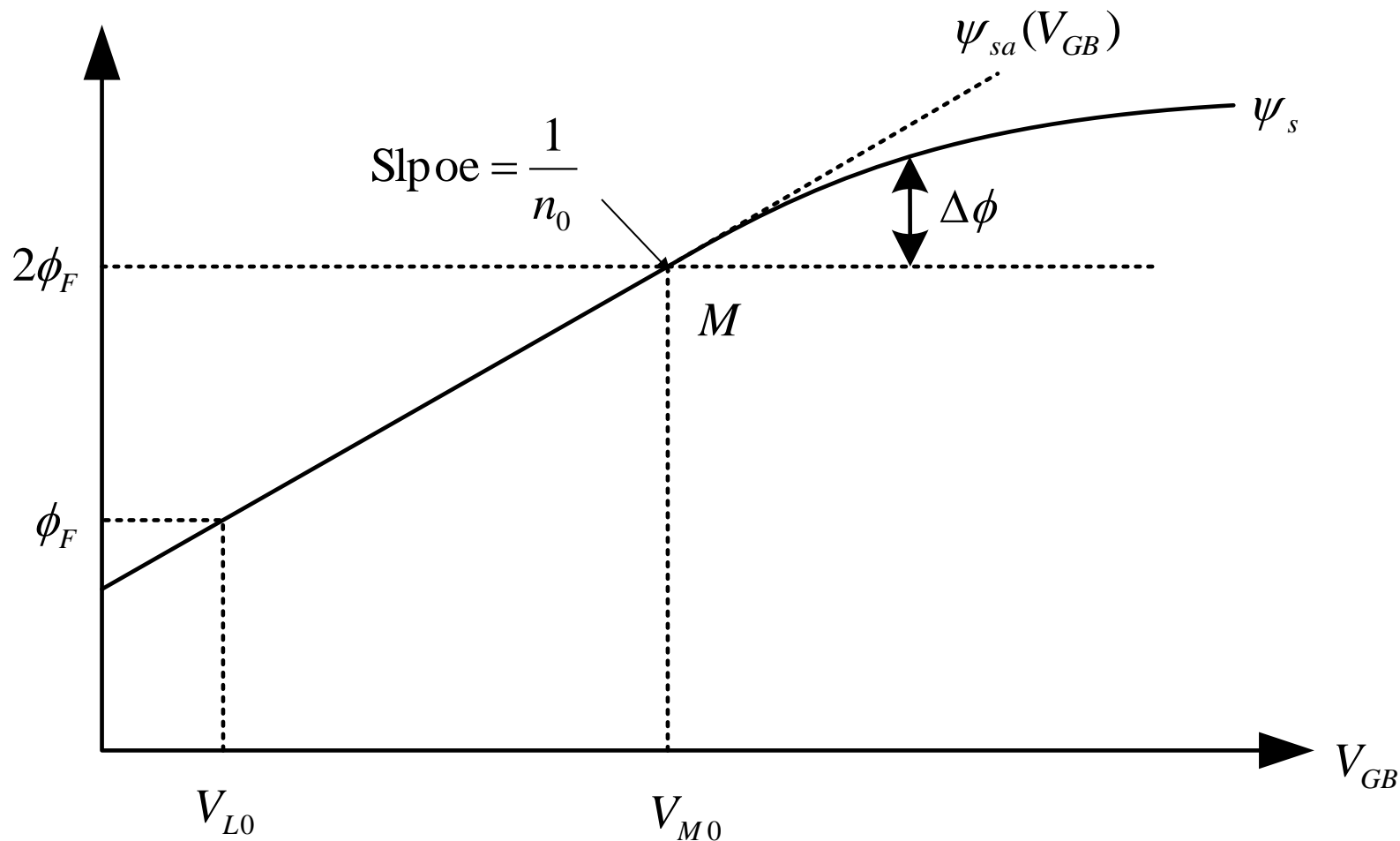
となる。 Q_I' は

$$Q_I' \approx -\frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{2\sqrt{2\phi_F}} \phi_t e^{(V_{GB}-V_{M0})/n_0\phi_t} = Q_{M0}' e^{(V_{GB}-V_{M0})/n_0\phi_t}$$

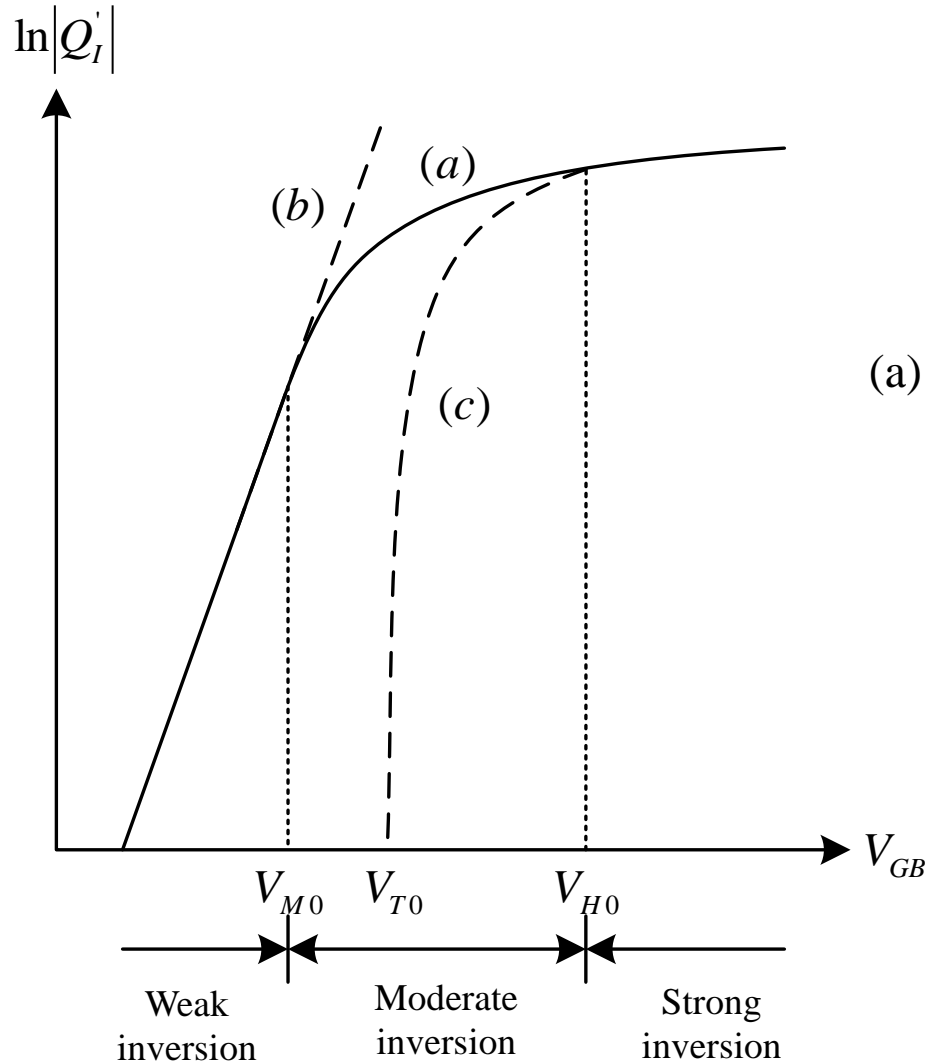
$$(Q_{M0}' = -\frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{2\sqrt{2\phi_F}} \phi_t)$$

となる。

弱反転領域 (反転電荷とゲート電圧: 4)



反転層電荷とゲート～基板間電圧



$$(a) \begin{cases} Q_I' = -\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \left(\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}} - \sqrt{\psi_s} \right) \\ V_{GB} = V_{FB} + \psi_s + \gamma \sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}} \end{cases}$$

$$(b) Q_I' \approx Q_{M0}' e^{(V_{GB} - V_{M0})/n_0\phi_t}$$

$$(c) Q_I' = -C_{ox}' (V_{GB} - V_{T0})$$

小信号容量(ゲート～基板間)

ゲート～基板間容量 (単位面積当り)

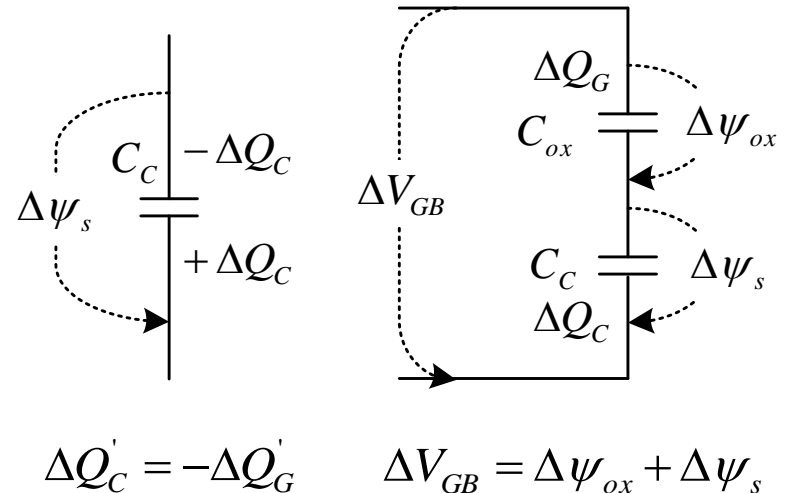
$$C'_{gb} \equiv \frac{dQ'_G}{dV_{GB}}$$

とすると、以下の如くになる。

$$\frac{1}{C'_{gb}} = \frac{dV_{GB}}{dQ'_G}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{d\psi_{ox}}{dQ'_G} + \frac{d\psi_s}{dQ'_G} \\ &= \frac{1}{\frac{dQ'_G}{d\psi_{ox}}} + \frac{1}{-\frac{dQ'_C}{d\psi_s}} \\ &= \frac{1}{C'_{ox}} + \frac{1}{C'_c} \end{aligned}$$

ここで、 $C'_{ox} = \frac{dQ'_G}{d\psi_{ox}}$, $C'_c = -\frac{dQ'_C}{d\psi_s}$



半導体中の全電荷による小信号容量

$C'_c \equiv -\frac{dQ'_c}{d\psi_s}$ の具体的な式

$$C'_c = \sqrt{2q\epsilon_s N_A} \left\{ \frac{1 - e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} (e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - 1)}{2\sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + \psi_s - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} (\phi_t e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - \psi_s - \phi_t)}} \right\}$$

$\psi_s > 3\phi_t$ の場合

$$C'_c = \sqrt{2q\epsilon_s N_A} \left\{ \frac{1 + e^{-\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}{2\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{-\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}} \right\}$$

反転層容量の具体的な式(1)

y_c を $\psi = 0$ のところでの y (∞ でも可) とすると、
 Q_I' は、(p型基板の場合)

$$Q_I' = -q \int_{y_{surface}}^{y_c} n(y) dy$$
$$= -q N_A e^{-\frac{2\phi_F \psi_s}{\phi_t}} \int_0^{\psi} \frac{e^{\psi(y)/\phi_t}}{E(\psi)} d\psi$$

となる。

$$n(y) = n_0 e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}}$$
$$\cong N_A e^{-\frac{2\phi_F \psi_s}{\phi_t}} e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}}$$
$$E = -\frac{d\psi}{dy}$$

反転層容量の具体的な式(2)

したがって、 C_i' は、 $(\psi_s > 3\phi_t)$ の場合)

$$\begin{aligned} C_i' &\equiv \frac{-dQ_I'}{d\psi_s} \\ &= qN_A e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \frac{e^{\psi_s/\phi_t}}{E(\psi_s)} \\ &\cong q\varepsilon_s N_A e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t} \frac{1}{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \sqrt{\psi_s + \phi_t} e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}} \\ &= \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \frac{e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}}{2\sqrt{\psi_s + \phi_t} e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}} \end{aligned}$$

となる。

空乏層容量の具体的な式(1)

y_c を $\psi = 0$ のところでの y (∞ でも可) とすると、
 Q_B' は、(p型基板の場合)

$$\begin{aligned} Q_B' &= q \int_{y_{surface}}^{y_c} [p(y) - N_A] dy \\ &= -qN_A \int_0^{\psi_s} \frac{(1 - e^{-\psi(y)/\phi_t})}{E} d\psi \end{aligned}$$

となる。

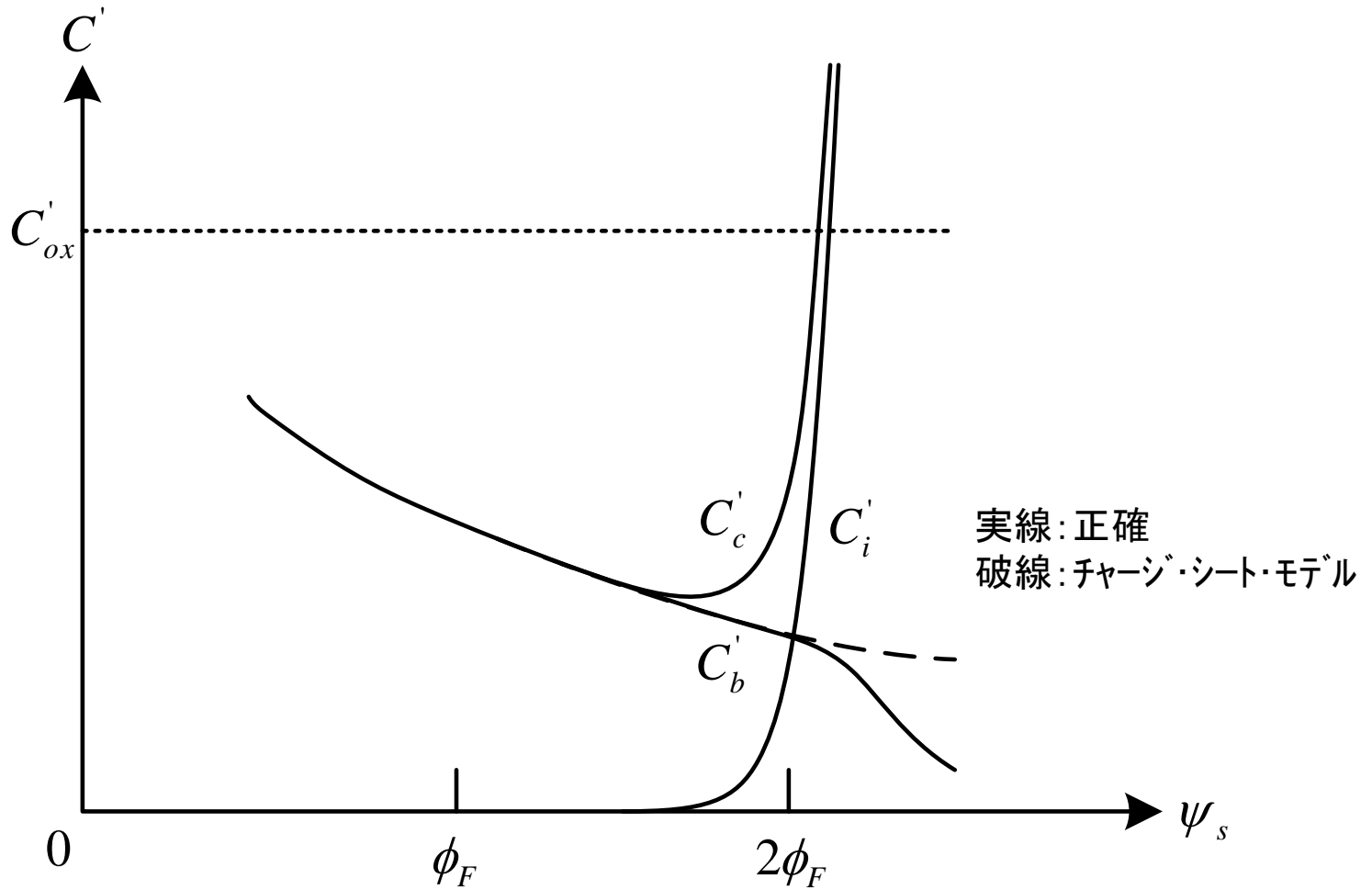
$$\begin{aligned} p(y) &= p_0 e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} \\ &\cong N_A e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} \\ E &= -\frac{d\psi}{dy} \end{aligned}$$

空乏層容量の具体的な式(2)

したがって、 C'_b は以下になる。 ($\psi_s > 3\phi_t$ の場合)

$$\begin{aligned}
 C'_b &\equiv \frac{-dQ'_B}{d\psi_s} = qN_A \frac{1 - e^{-\psi_s/\phi_t}}{E(\psi_s)} \\
 &= qN_A \frac{1 - e^{-\psi_s/\phi_t}}{\frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{\epsilon_s} \sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + \psi_s - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} (\phi_t e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - \psi_s - \phi_t)}} \\
 &\cong q\epsilon_s N_A \frac{1}{\sqrt{2q\epsilon_s N_A} \sqrt{\psi_s + \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}}} \\
 &= \sqrt{2q\epsilon_s N_A} \frac{1}{2\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}}}
 \end{aligned}$$

小信号容量と表面電位



空乏層容量と反転層容量

$$\Delta Q'_C = \Delta Q'_B + \Delta Q'_I$$

$$\frac{-dQ'_C}{d\psi_s} = \frac{-dQ'_B}{d\psi_s} + \frac{-dQ'_I}{d\psi_s}$$

ここで、

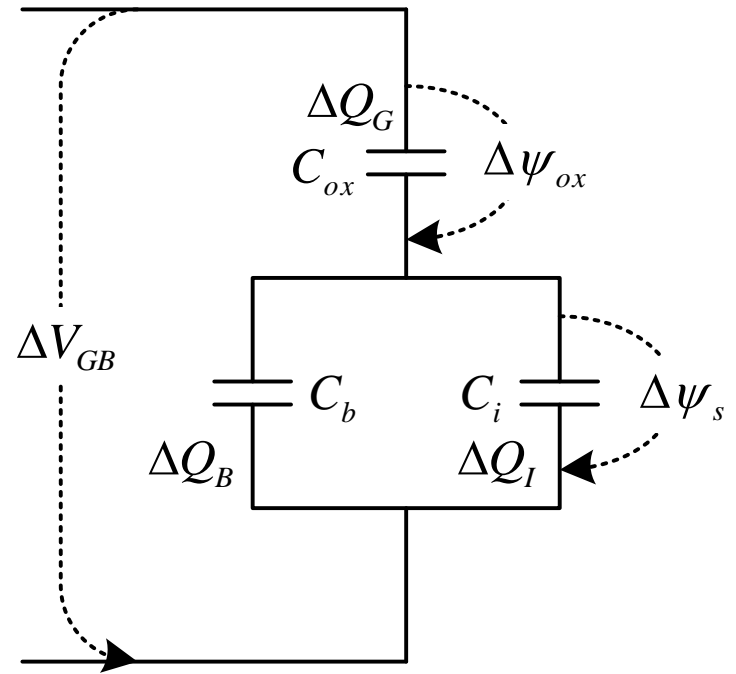
$$C'_b \equiv \frac{-dQ'_B}{d\psi_s}, \quad C'_i \equiv \frac{-dQ'_I}{d\psi_s}$$

とすると、

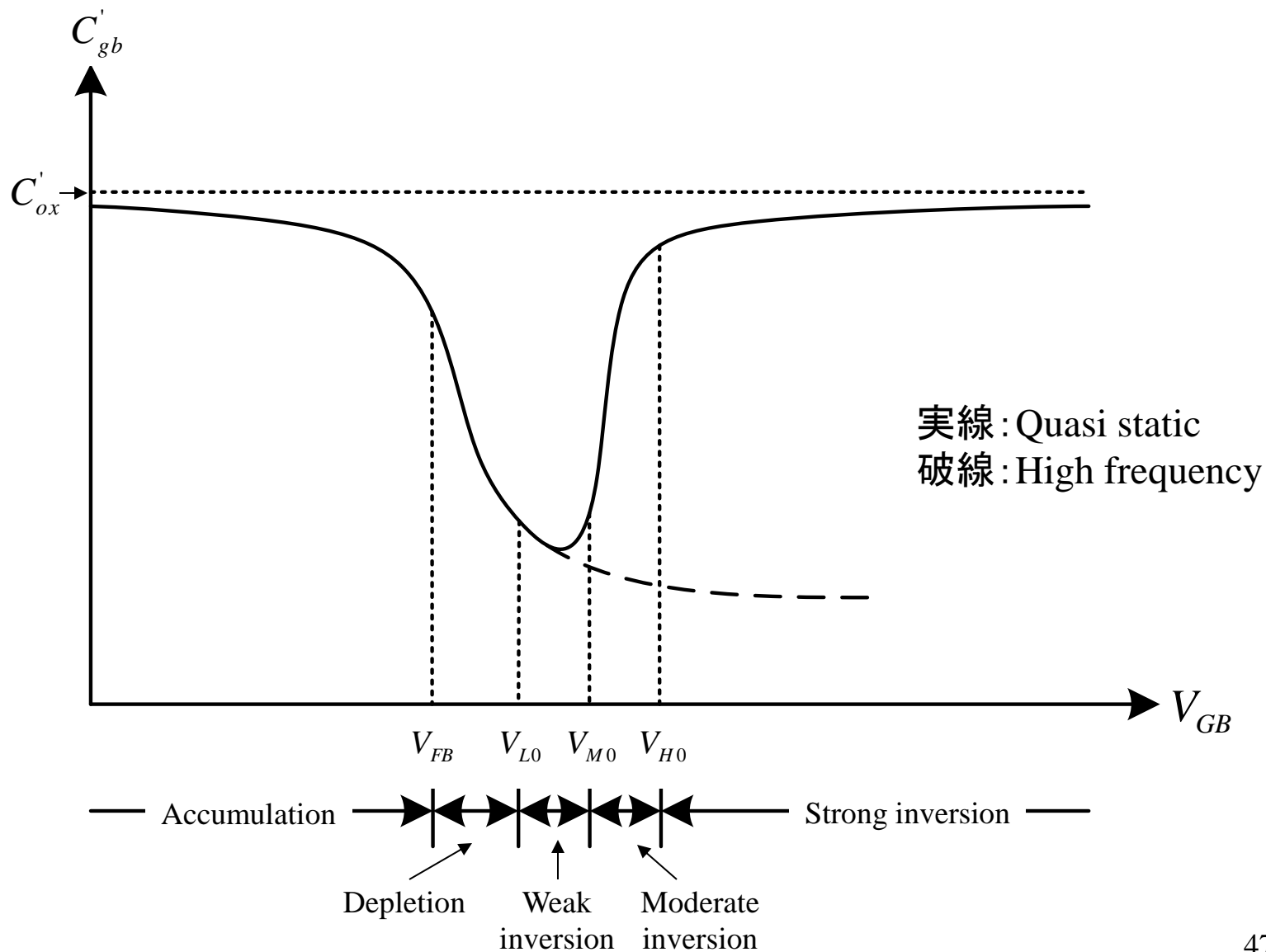
$$C'_c = C'_b + C'_i$$

したがって、以下の如くになる。

$$\frac{1}{C'_{gb}} = \frac{1}{C'_{ox}} + \frac{1}{C'_b + C'_i}$$



ゲート基板間容量とゲート～基板間電圧



表面電位と容量の関係(1)

$$V_{GB} = V_{FB} + \psi_s - \frac{Q'_I(\psi_s) + Q'_B(\psi_s)}{C'_{ox}}$$

$$\frac{dV_{GB}}{d\psi_s} = 1 + \frac{1}{C'_{ox}} (C'_b + C'_i)$$

$$\therefore \frac{d\psi_s}{dV_{GB}} = \frac{C'_{ox}}{C'_{ox} + C'_b + C'_i}$$

$$C'_b \equiv \frac{-dQ'_B}{d\psi_s}$$
$$C'_i \equiv \frac{-dQ'_I}{d\psi_s}$$

弱反転領域では、 $C'_b \gg C'_i$ であるため

$$\frac{d\psi_s}{dV_{GB}} = \frac{C'_{ox}}{C'_{ox} + C'_b}$$

となる。

表面電位と容量の関係(2)

したがって、

$$\begin{aligned}n &\equiv \left(\frac{d\psi_s}{dV_{GB}} \right)^{-1} = 1 + \frac{C'_b}{C'_{ox}} \\ &= 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_s}} \cong 1 + \frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_{sa}}}\end{aligned}$$

となる。また、界面準位による容量も考慮すると

$$n = 1 + \frac{C'_b + C'_{it}}{C'_{ox}}$$

となる。ここで、 $C'_{it} \equiv \frac{-dQ'_{it}}{d\psi_s}$ である。

C'_{it} は C'_b と C'_i に並列になる。

フラットバンド容量

フラットバンド容量 C'_{FB} は、

$$C'_{FB} = \lim_{\psi_s \rightarrow 0} C'_c, \quad C'_c = \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \left[\frac{1 - e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - 1 \right)}{2\sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} + \psi_s - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \left(\phi_t e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}} - \psi_s - \phi_t \right)}} \right]$$

である。 $\psi_s \rightarrow 0$ で、[]の中は、 $\frac{0}{0}$ となるので、

$$e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}} \approx 1 + \left(-\frac{\psi_s}{\phi_t} \right) + \frac{1}{2} \left(-\frac{\psi_s}{\phi_t} \right)^2$$

として、 $\psi_s \rightarrow 0$ にすると、極限值が求まる。この極限值は、以下となる。

$$C'_{FB} = \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \sqrt{\frac{1 + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}}}{2\phi_t}} \quad \left[\text{但し、} \lambda_p = \left(\phi_t \frac{\varepsilon_s}{qN_A} \right)^{\frac{1}{2}} : \text{デバイ長} \right]$$

$$\approx \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \sqrt{\frac{1}{2\phi_t}} = \frac{\varepsilon_s}{\lambda_p}$$

基板密度の導出方法

高周波 $C-V$ のゲート～基板間の最大容量値 C_{gbmax} は、

$$C_{gbmax} = C_{ox} \quad (\text{蓄積状態})$$

である。また、反転層が形成された後の空乏層容量は

$$C_{dm} = \frac{\epsilon_s}{d_{Bm}} A = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} \sqrt{2\phi_F}} A = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{2\sqrt{2\phi_F}} A \quad (A: \text{容量断面積})$$

である。この場合、ゲート～基板間の最小容量値 C_{gbmin} は、

$$\frac{1}{C_{gbmin}} = \frac{1}{C_{gbmax}} + \frac{1}{C_{dm}}$$

となる。これから以下を得る。

$$C_{dm} = \frac{C_{gbmax} C_{gbmin}}{C_{gbmax} - C_{gbmin}}$$

測定値 C_{gbmax} と C_{gbmin} から C_{dm} を求めると、 C_{dm} の上式から N_A を決定できる。

フラットバンド電圧の導出方法

高周波C-Vから求めた基板密度を用いると、
フラットバンド容量は、

$$C_{FB} \approx \sqrt{2q\epsilon_s N_A} \sqrt{\frac{1}{2\phi_t}} A \quad (A: \text{容量断面積})$$

で与えられる。この場合、フラットバンド電圧印加時の
ゲート～基板間容量 C_{gbFB} は、

$$C_{gbFB} = \frac{C_{ox} C_{FB}}{C_{ox} + C_{FB}} = \frac{C_{gbmax} C_{FB}}{C_{gbmax} + C_{FB}}$$

となる。すなわち、

$$\frac{C_{gbFB}}{C_{gbmax}} = \frac{C_{FB}}{C_{gbmax} + C_{FB}}$$

とし、右辺を実測から求めると、 C_{gbFB}/C_{gbmax} を決定できる。

これから、 V_{FB} が求まる。