2端子MOS構造

群馬大学
松田順一

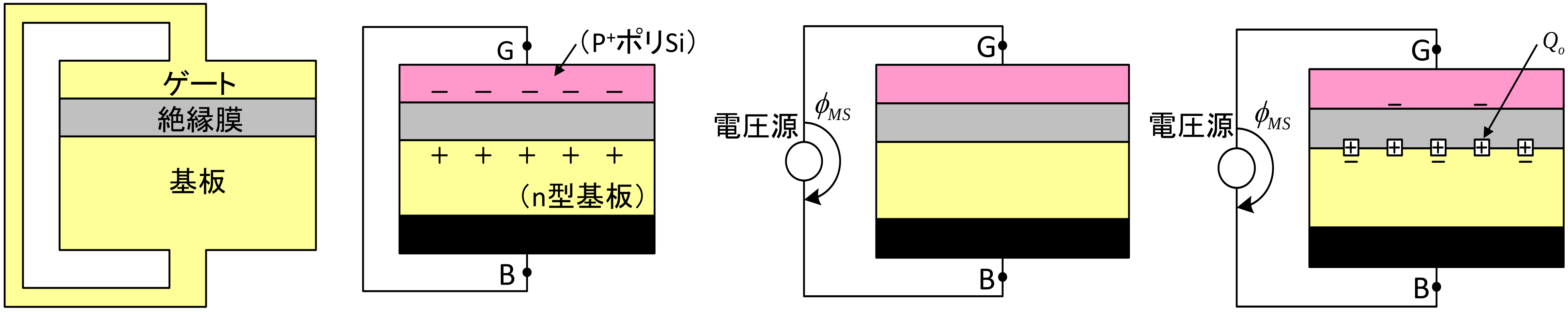
概要

- 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

（注）以下の本を参考に、本資料を作成した。

(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.

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

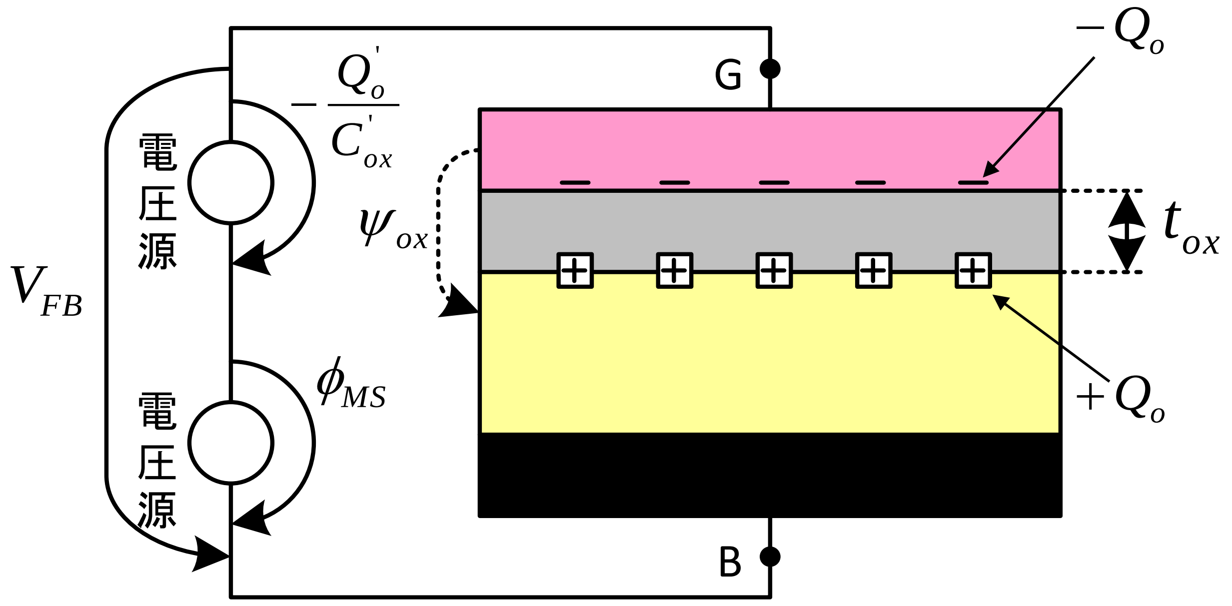
仕事関数差によりゲートと
基板側にそれぞれ電荷発生

$$\phi_{MS} = \phi_{Bulk\_material} - \phi_{gate\_material}$$

（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_oの影響

フラットバンド電圧説明（2）



（5）界面電荷の影響を打消す外部電圧印加

$$\psi_{ox} = -Q_o'/C_{ox}', \quad C_{ox}' = \varepsilon_{ox}/t_{ox}$$

$$\boxed{V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_o'}{C_{ox}'}}$$

V_{FB} :ﾌﾗｯﾄﾊﾞﾝﾄﾞ電圧

ϕ_{MS} :仕事関数差

$$\phi_{MS} = \phi_{Bulk\_material} - \phi_{gate\_material} \left(= \frac{W_M - W_S}{q} \right)$$

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

n^+ポリシリコンゲート

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

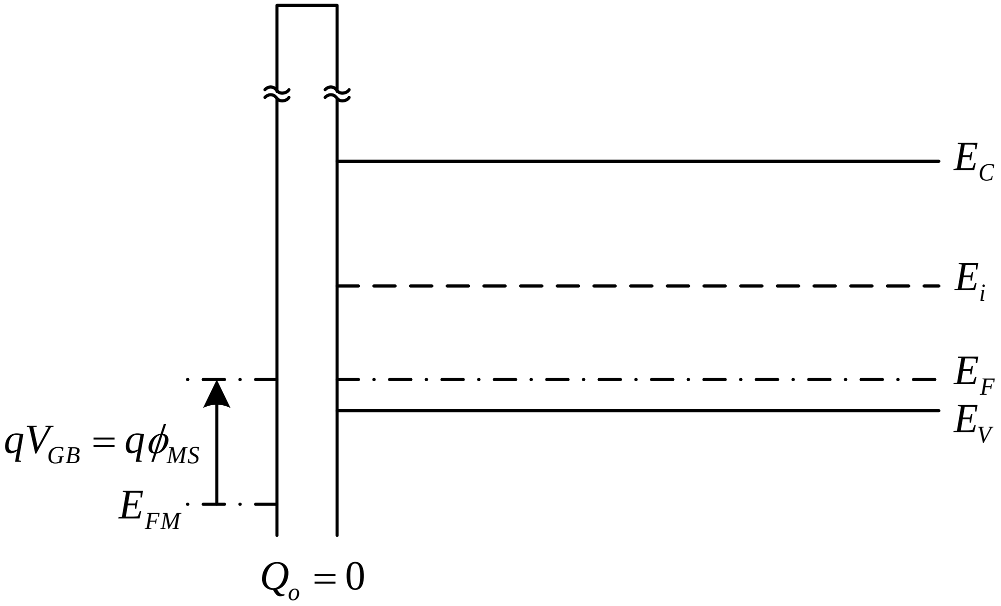
p^+ポリシリコンゲート

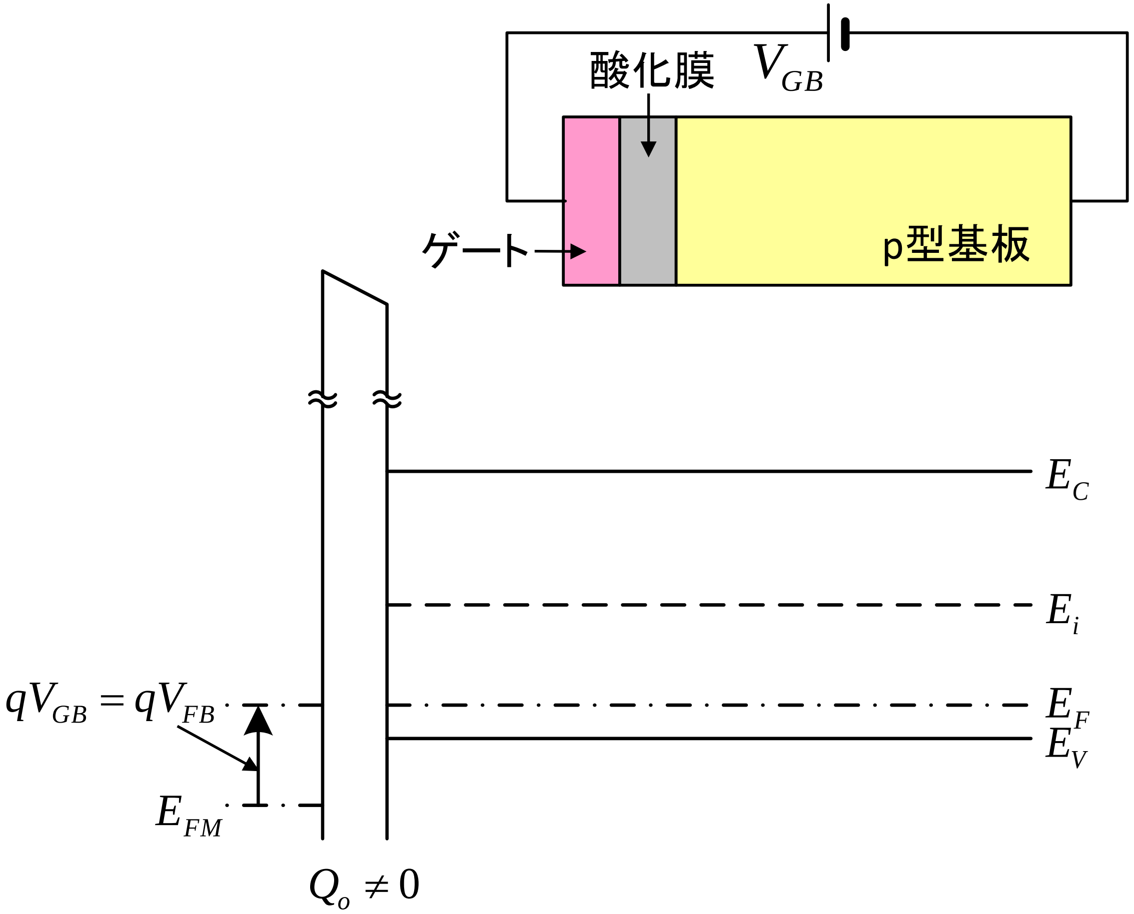
$$\phi_{MS} = -\phi_F + 0.56\mathrm{V}$$

実効界面電荷 Q_o

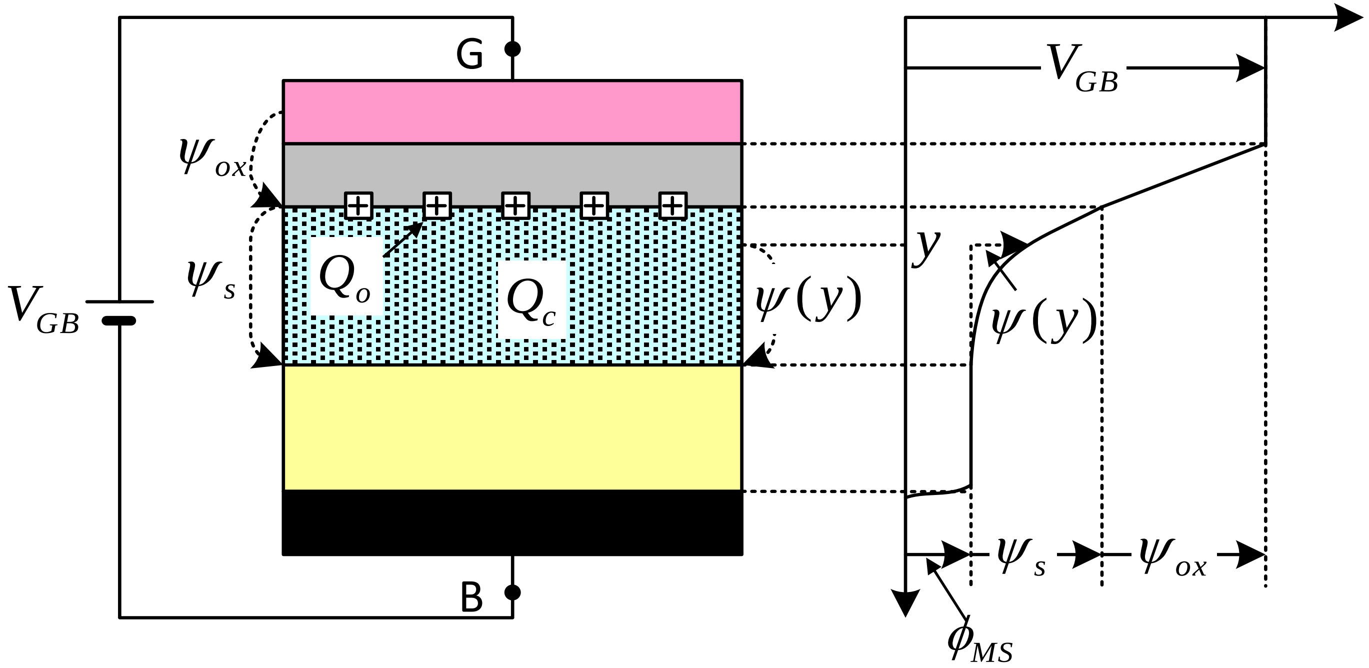
- 固定電荷
  - 酸化時にSi-SiO_2界面に形成
- 酸化膜中のトラップ電荷
  - 放射線、光エミッション、キャリア注入に起因
- 可動イオン(Na)電荷
  - 工程での環境に起因
- 界面トラップ電荷
  - 界面での欠陥に起因
  - 基板中のキャリアと電荷の交換あり

フラットバンドの説明図





電位バランス



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

$$\Delta Q_G^{'} + \Delta Q_C^{'} = 0$$

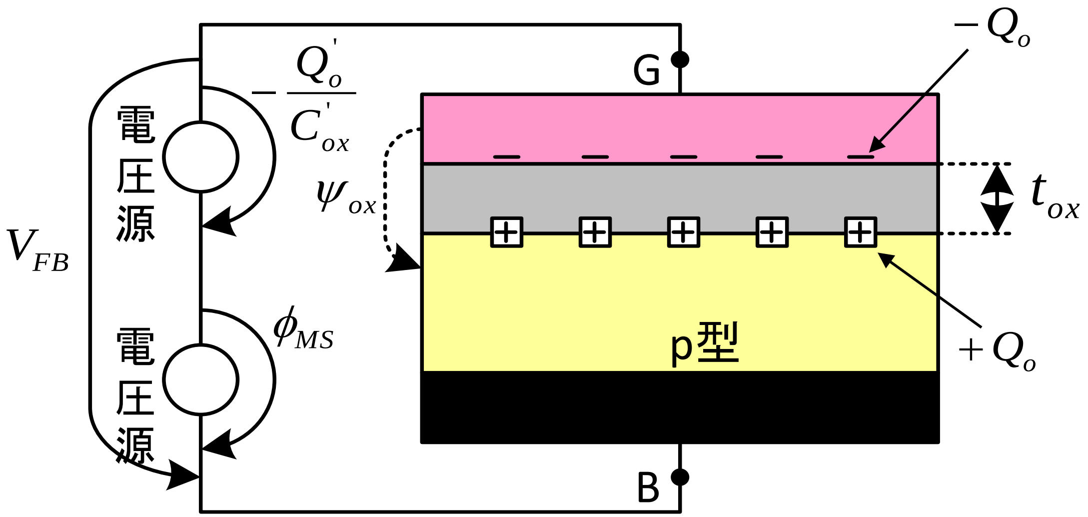
$Q_G^{'}$: 単位面積当りゲート上電荷

$Q_C^{'}$: 単位面積当り基板内電荷

（注）ここでは、$Q_o^{'}$を固定して考える。

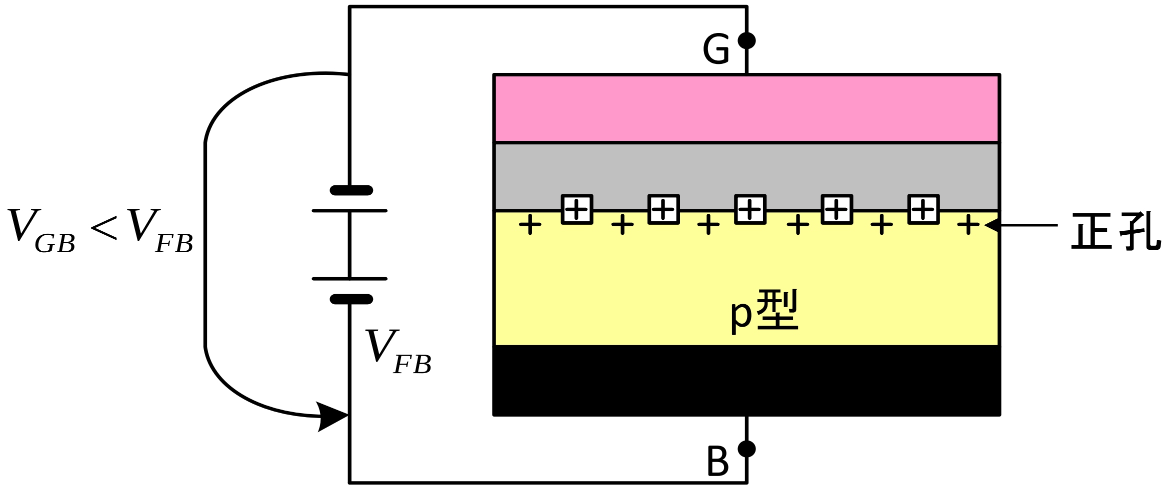
実際には、界面準位により$Q_o^{'}$は変化する。

フラットバンド状態と蓄積状態



フラットバンド状態

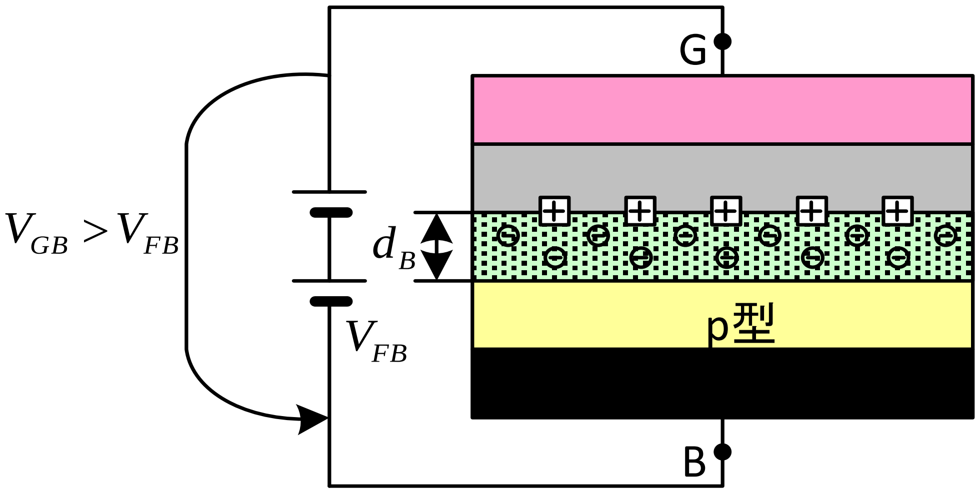
$$V_{GB} = V_{FB}, \quad Q_C' = 0, \quad \psi_s = 0$$



蓄積状態

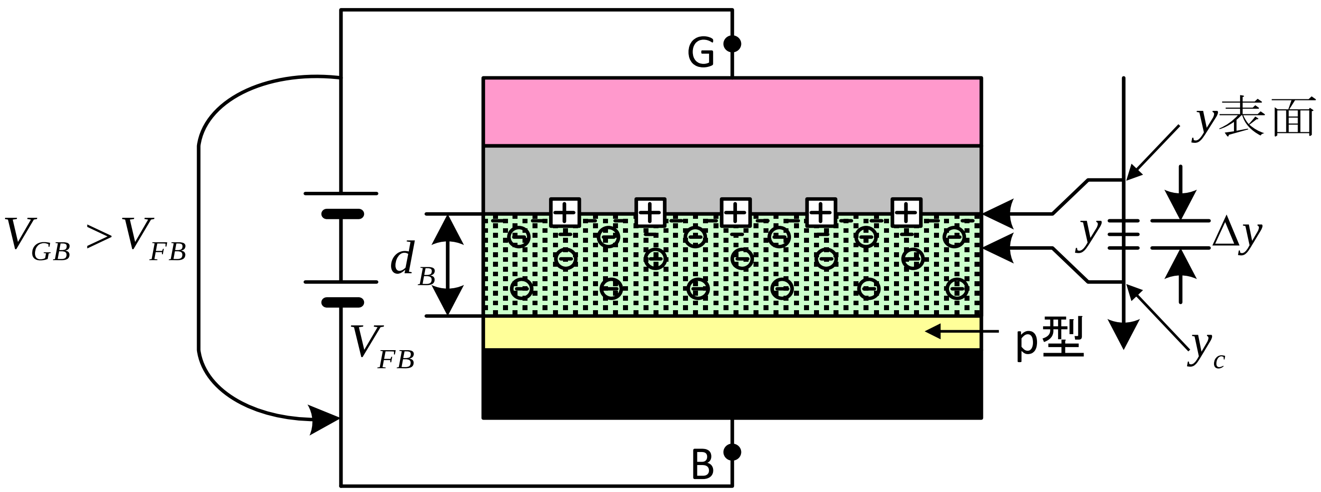
$$V_{GB} < V_{FB}, \quad Q_C' > 0, \quad \psi_s < 0$$

空乏状態と反転状態



空乏状態

$$V_{GB} > V_{FB}, \quad Q_C^{'} < 0, \quad \psi_s > 0$$



反転状態

$$V_{GB} > V_{FB}, \quad Q_C^{'} < 0, \quad \psi_s > 0$$

表面電荷

表面電荷（電子）密度

$$n_{surface} = n_0 e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}}$$

$$= n_i e^{\frac{\psi_S - \phi_F}{\phi_t}}$$

$$= p_0 e^{\frac{\psi_S - 2\phi_F}{\phi_t}}$$

$$\cong N_A e^{\frac{\psi_S - 2\phi_F}{\phi_t}}$$

平衡状態（ｐ型基板）

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

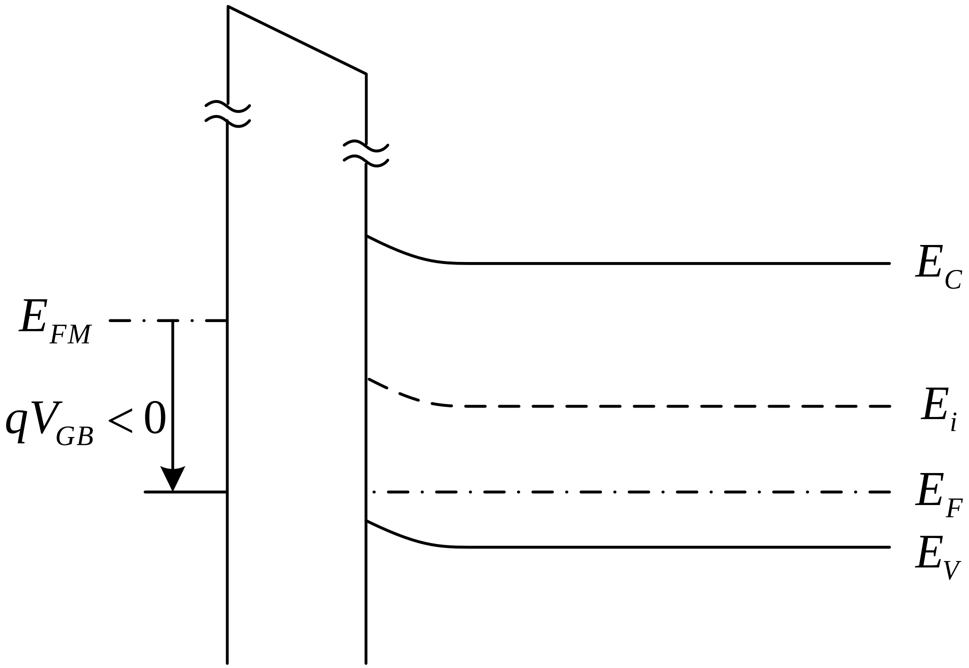
$$\phi_F = \phi_t \ln\left(\frac{n_i}{n_0}\right)$$

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

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

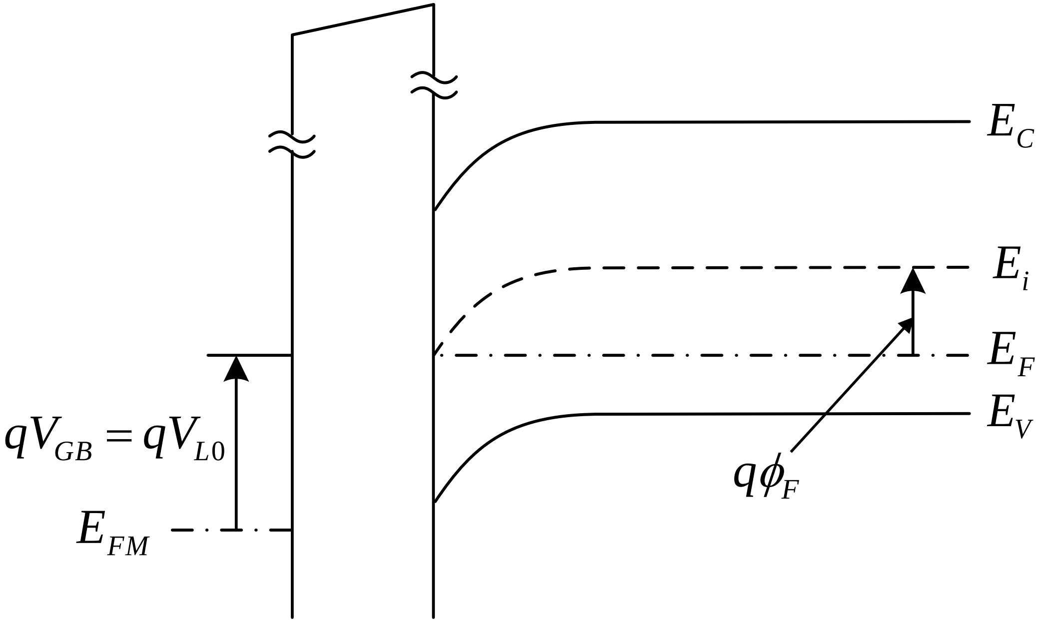
$$\Rightarrow \quad n_i = p_0 \exp\left(-\frac{\phi_F}{\phi_t}\right)$$

２端子MOS構造のエネルギーバンド図（蓄積状態と弱反転開始）



蓄積状態

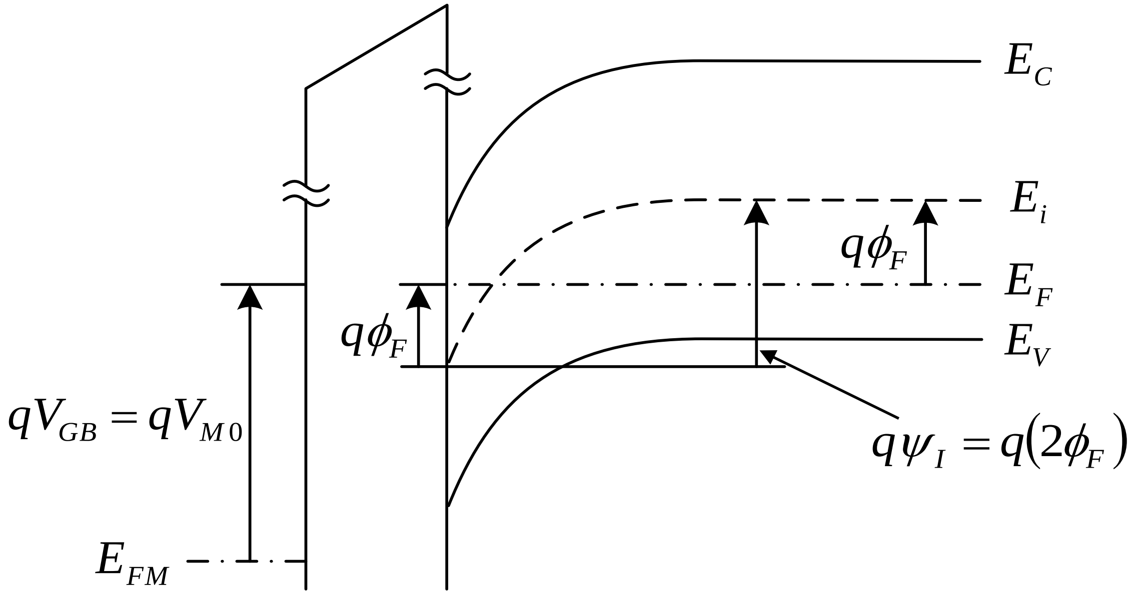
$\phi_{MS} = 0, \quad Q_o^{'} = 0$



弱反転状態

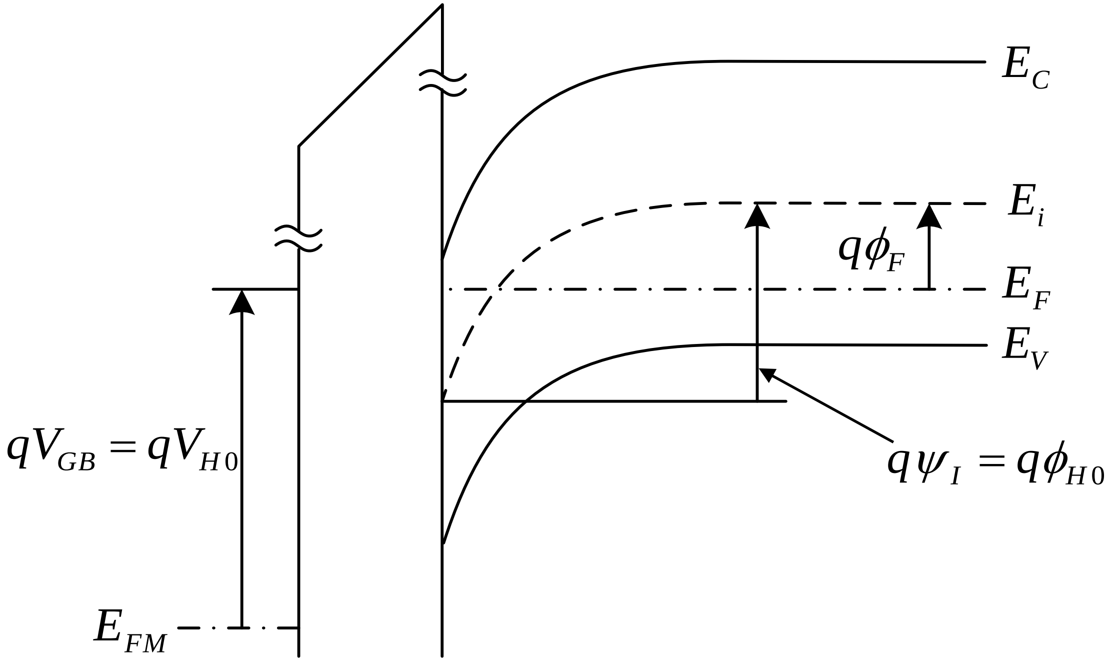
$\phi_{MS} = 0, \quad Q_o^{'} = 0$

２端子MOS構造のエネルギーバンド図（中（緩やかな）反転開始と強反転開始）



中（緩やかな）反転開始

$\phi_{MS} = 0, \quad Q_o^{'} = 0$



強反転開始

$\phi_{MS} = 0, \quad Q_o^{'} = 0$

全体的な解析（ポアソンの式）

・**電荷密度**

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

$$n(y) = n_0 \exp\left(\frac{\psi(y)}{\phi_t}\right), \quad p(y) = p_0 \exp\left(-\frac{\psi(y)}{\phi_t}\right)$$

$$p_0 - n_0 = N_A$$

p基板
深さ方向：y

・**ポアソンの式**

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

ポアソンの式の解

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

とするとポアソンの式は、以下の如くになる。

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

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、

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

となる。

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

$$\left(\frac{d\psi}{dy}\right)^2 = -\frac{2qN_A}{\varepsilon_s}\int_0^{\psi}\left[e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1 - e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}}(e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - 1)\right]d\psi$$

$$= \frac{2qN_A}{\varepsilon_s}\left[\phi_t e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} + \psi - \phi_t + e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}}(\phi_t e^{\frac{\psi(y)}{\phi_t}} - \psi - \phi_t)\right]$$

したがって電界　$\mathrm{E}(y) = -\dfrac{d\psi}{dy}$　は

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

となる。

ここで　$+:\psi > 0,\quad -:\psi < 0$

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。

$$Q_C^{'} = -\varepsilon_s \mathrm{E}_{surface}, \quad \psi(0) = \psi_s$$

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

また、$Q_C^{'}$に対する容量　$C_c^{'} \equiv -\dfrac{dQ_C^{'}}{d\psi_s}$　は

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

となる。

反転領域(反転層電荷)

$\psi_s \geq \phi_F$,　p 基板の場合

$$Q_C' = -\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}$$

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

となる。ここで、

$$Q_C' = Q_I' + Q_B'$$

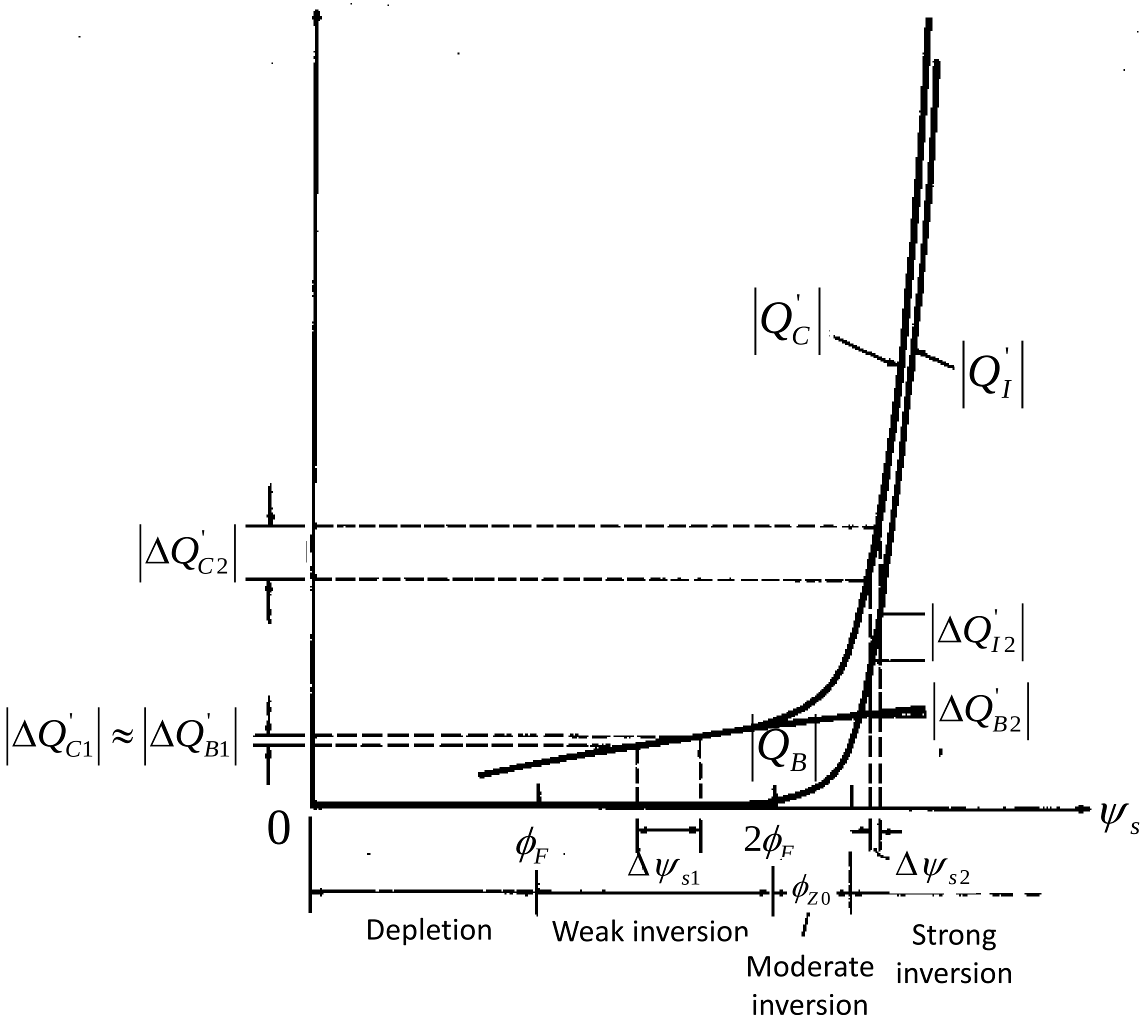
から

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

となる。

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



電荷(反転層、空乏層及びその和)と表面電位

反転領域（表面電位とｹﾞｰﾄ電圧）

電圧及び電荷の関係

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

$$Q_G^{'} + Q_o^{'} + Q_I^{'} + Q_B^{'} = 0$$

$$Q_G^{'} = C_{ox}^{'} \psi_{ox}$$

$$Q_I^{'} = Q_I^{'}(\psi_s)$$

$$Q_B^{'} = Q_B^{'}(\psi_s)$$

ｹﾞｰﾄ～基板間電圧と表面電位

$$V_{GB} = -\frac{1}{C_{ox}^{'}}\left[Q_o^{'} + Q_I^{'}(\psi_s) + Q_B^{'}(\psi_s)\right] + \psi_s + \phi_{MS}$$

$$= \phi_{MS} - \frac{Q_o^{'}}{C_{ox}^{'}} + \psi_s - \frac{Q_I^{'}(\psi_s) + Q_B^{'}(\psi_s)}{C_{ox}^{'}}$$

$$= V_{FB} + \psi_s - \frac{Q_I^{'}(\psi_s) + Q_B^{'}(\psi_s)}{C_{ox}^{'}}$$

$$V_{GB} = V_{FB} + \psi_s + \frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}}{C_{ox}^{'}}\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}$$

$$= V_{FB} + \psi_s + \gamma\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{\frac{\psi_s - 2\phi_F}{\phi_t}}}$$

ここで、

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

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

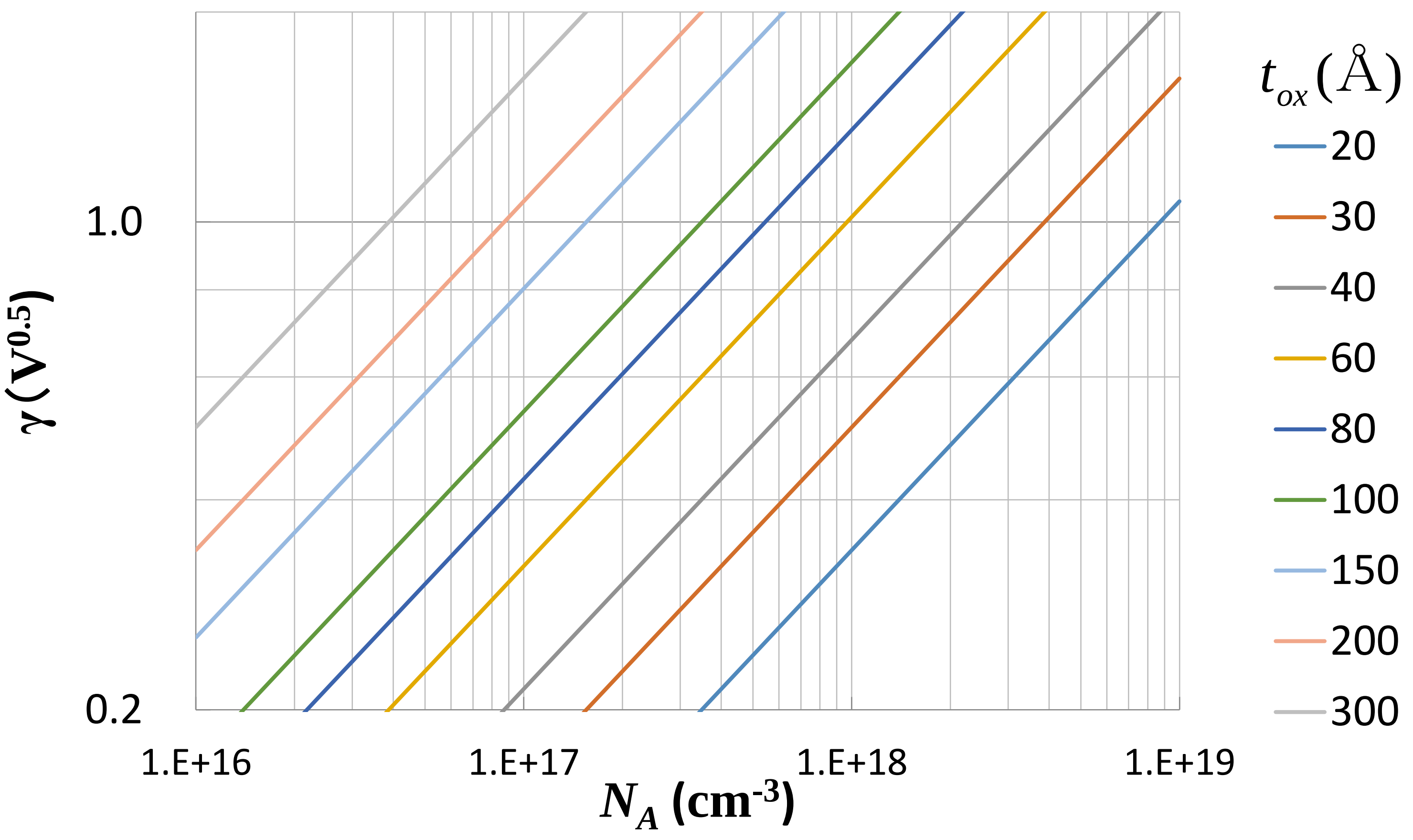
$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}}{C_{ox}^{'}}$$

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

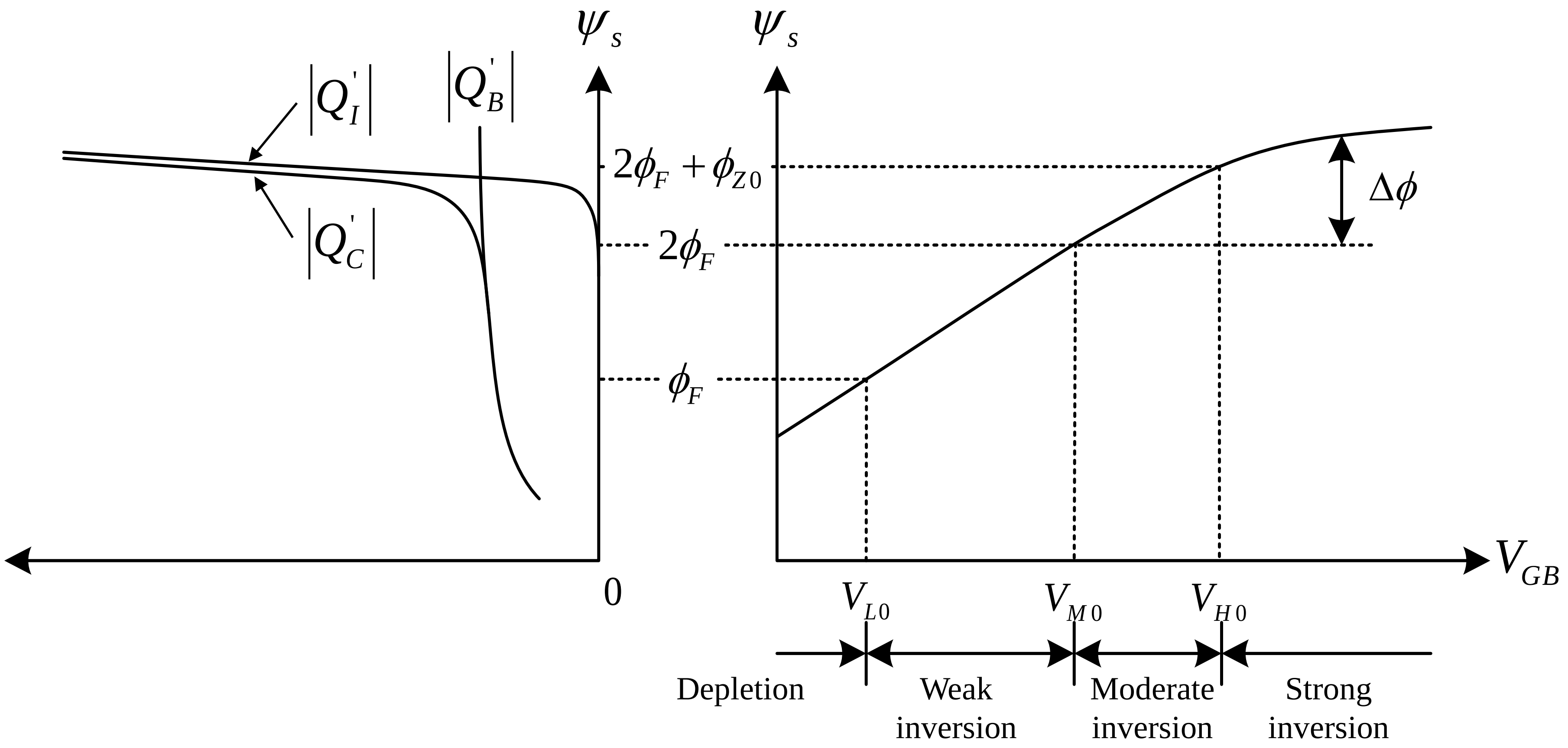
$$V_{M0} = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma\sqrt{2\phi_F}$$

V_{L0} :弱反転開始電圧, V_{M0} :中反転開始電圧

基板効果係数


1.0
0.2
γ (V^0.5)
1.E+16
1.E+17
1.E+18
1.E+19
N_A (cm^-3)
t_ox (Å)
20
30
40
60
80
100
150
200
300

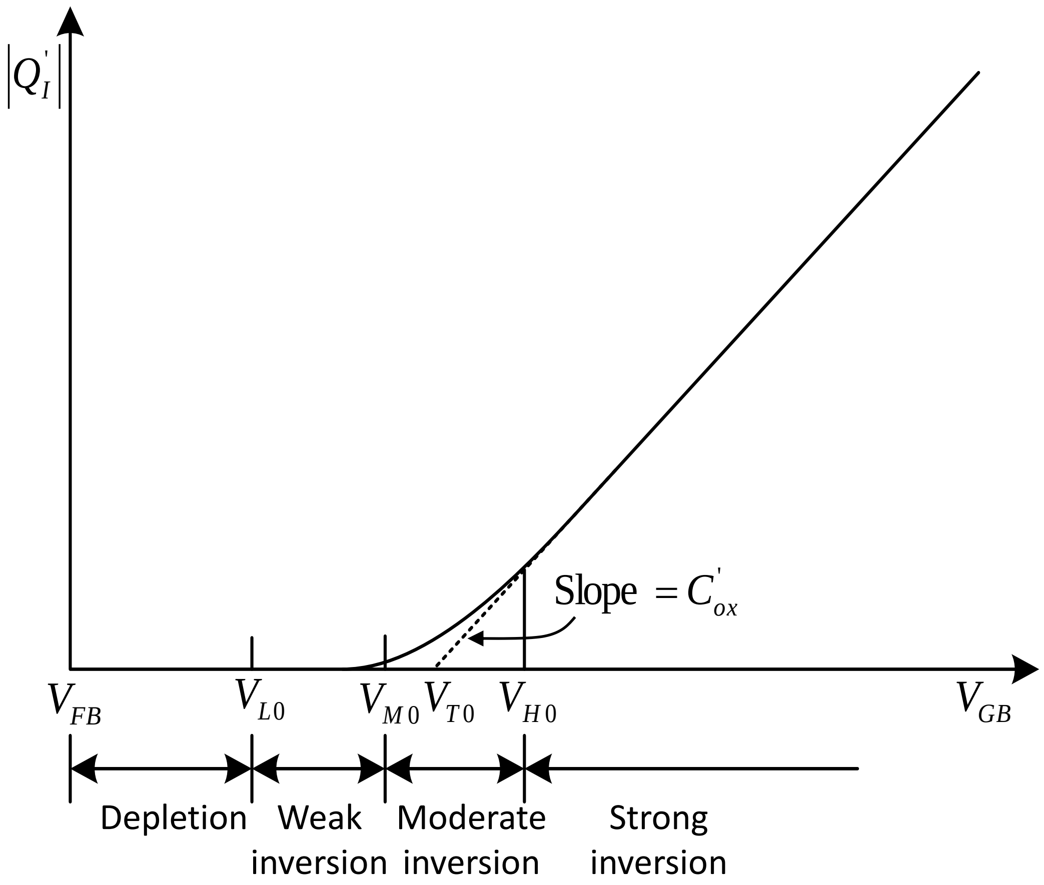
表面電位とゲート基板間電圧及び電荷と表面電位



反転領域(反転層電荷とｹﾞｰﾄ電圧)

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

$$\because V_{GB} = \psi_{ox} + \psi_s + \phi_{MS}$$
$$\because Q_B' = -\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\psi_s}$$



強反転領域と強反転領域の電荷

強反転領域の表面電位は、

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

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

$$= -C_{ox}'\left(V_{GB} - V_{T0}\right)$$

となる。ここで

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

である。

V_{T0}: 外挿しきい値電圧

反転領域の電荷は

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

弱反転領域では、$\psi_s \le 2\phi_F$ 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、

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

弱反転領域（反転電荷と表面電位）

反転領域の電荷は

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

弱反転領域では、$\psi_s \le 2\phi_F$ 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、

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

弱反転領域（反転電荷とｹﾞｰﾄ電圧：１）

弱反転領域では、$\psi_s \le 2\phi_F$ であるから

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

$$\cong V_{FB} + \psi_s + \gamma\sqrt{\psi_s}$$

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、

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

となる。

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

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

となる。ここで、

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

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

である。

弱反転領域（反転電荷とｹﾞｰﾄ電圧：２）

したがって、

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

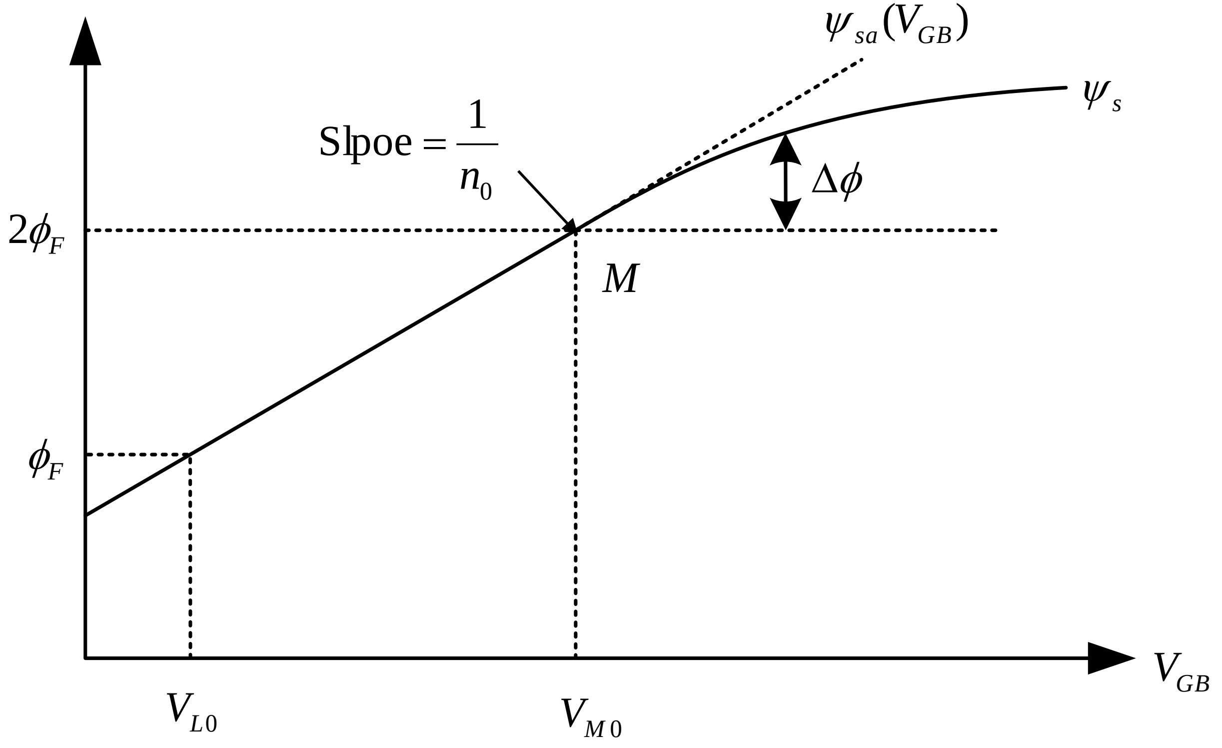
となる。Q_I'は

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

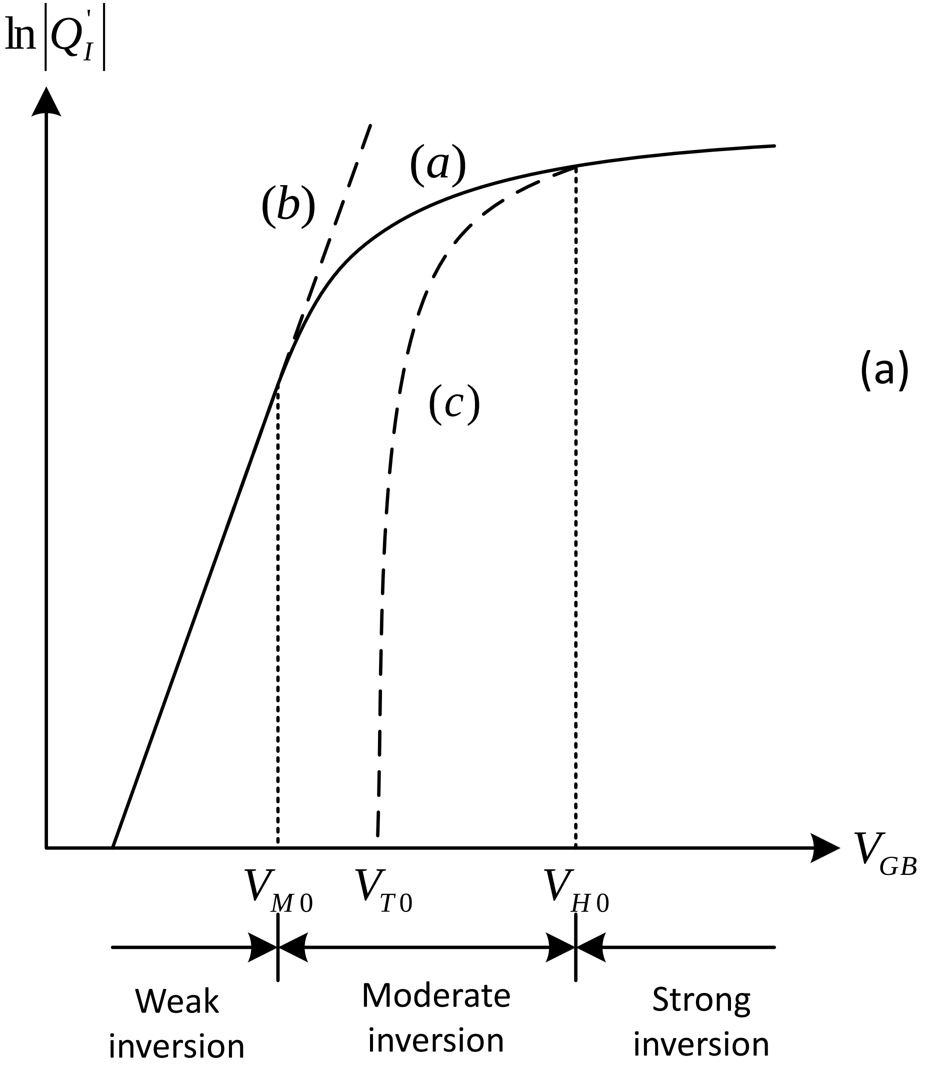
$$= Q'_{M0} e^{(V_{GB}-V_{M0})/n_0\phi_t}$$

$$\left(Q'_{M0} = -\frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}}{2\sqrt{2\phi_F}}\phi_t\right)$$

となる。



反転層電荷とゲート～基板間電圧



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

(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)

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

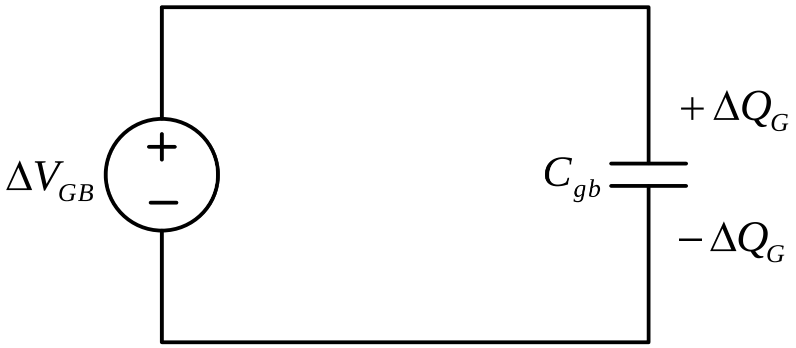
とすると、以下の如くになる。

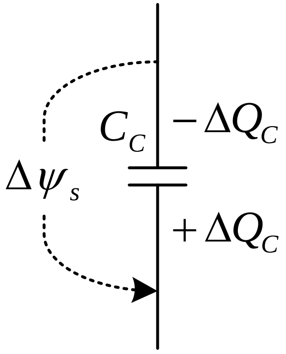
$$\frac{1}{C'_{gb}} = \frac{dV_{GB}}{dQ'_G} = \frac{d\psi_{ox}}{dQ'_G} + \frac{d\psi_s}{dQ'_G}$$

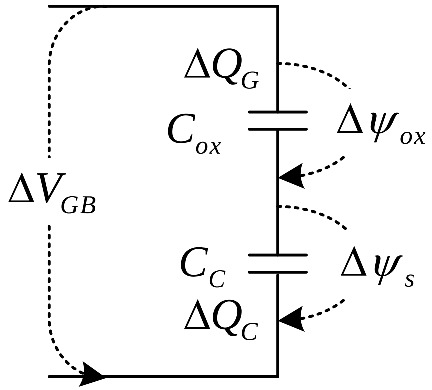
$$= \frac{1}{\dfrac{dQ'_G}{d\psi_{ox}}} + \frac{1}{-\dfrac{dQ'_C}{d\psi_s}}$$

$$= \frac{1}{C'_{ox}} + \frac{1}{C'_c}$$

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







$\Delta Q'_C = -\Delta Q'_G$　　$\Delta V_{GB} = \Delta\psi_{ox} + \Delta\psi_s$

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

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

$\psi_s > 3\phi_t$ の場合

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

反転層容量の具体的な式

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）

$$Q_I' = -q \int_{y_{surface}}^{y_c} n(y)dy$$

$$= -qN_A e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \int_0^{\psi_s} \frac{e^{\psi(y)/\phi_t}}{\mathrm{E}(\psi)} d\psi$$

となる。

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

$$\mathrm{E} = -\frac{d\psi}{dy}$$

したがって、C_i'は、　（$\psi_s > 3\phi_t$の場合）

$$C_i' \equiv \frac{-dQ_I'}{d\psi_s}$$

$$= qN_A e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}} \frac{e^{\psi_s/\phi_t}}{\mathrm{E}(\psi_s)}$$

$$\cong q\varepsilon_s N_A e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t} \frac{1}{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}}}$$

$$= \sqrt{2q\varepsilon_s N_A} \frac{e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}}{2\sqrt{\psi_s + \phi_t e^{(\psi_s - 2\phi_F)/\phi_t}}}$$

となる。

空乏層容量の具体的な式

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）

$$Q_B^{'} = q\int_{y_{surface}}^{y_c}\left[p(y)-N_A\right]dy$$

$$= -qN_A\int_0^{\psi_s}\frac{\left(1-e^{-\psi(y)/\phi_t}\right)}{\mathrm{E}}d\psi$$

となる。

$$p(y)=p_0 e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}} \cong N_A e^{-\frac{\psi(y)}{\phi_t}}$$

$$\mathrm{E}=-\frac{d\psi}{dy}$$

したがって、$C_b^{'}$は以下になる。　$(\psi_s>3\phi_t$の場合）

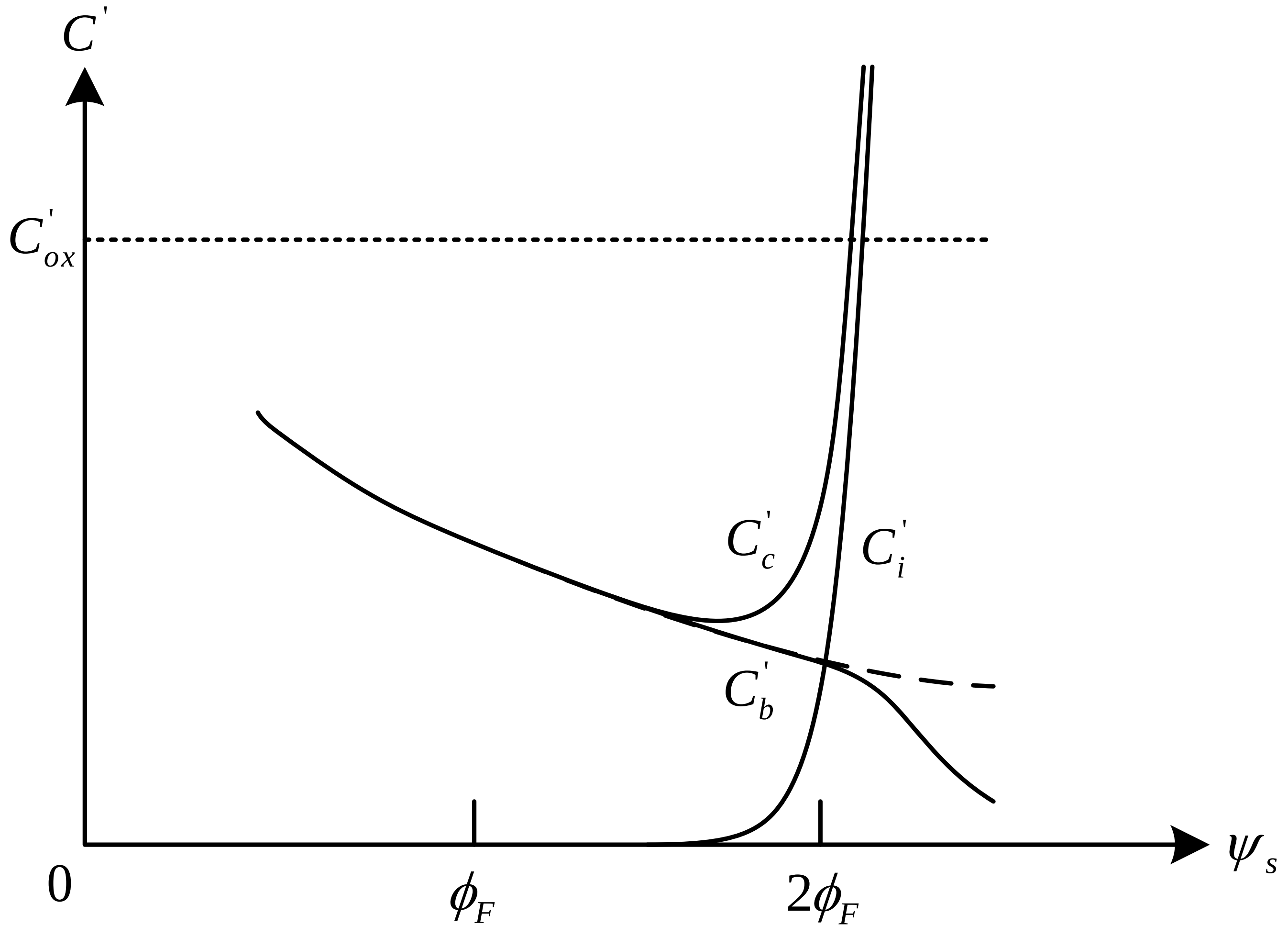
$$C_b^{'} \equiv \frac{-dQ_B^{'}}{d\psi_s} = qN_A\frac{1-e^{-\psi_s/\phi_t}}{\mathrm{E}(\psi_s)}$$

$$= qN_A\frac{1-e^{-\psi_s/\phi_t}}{\frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}}{\varepsilon_s}\sqrt{\phi_t e^{-\frac{\psi_s}{\phi_t}}+\psi_s-\phi_t+e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}}(\phi_t e^{\frac{\psi_s}{\phi_t}}-\psi_s-\phi_t)}}$$

$$\cong q\varepsilon_s N_A\frac{1}{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\psi_s+\phi_t e^{(\psi_s-2\phi_F)/\phi_t}}}$$

$$= \sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\frac{1}{2\sqrt{\psi_s+\phi_t e^{(\psi_s-2\phi_F)/\phi_t}}}$$

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、

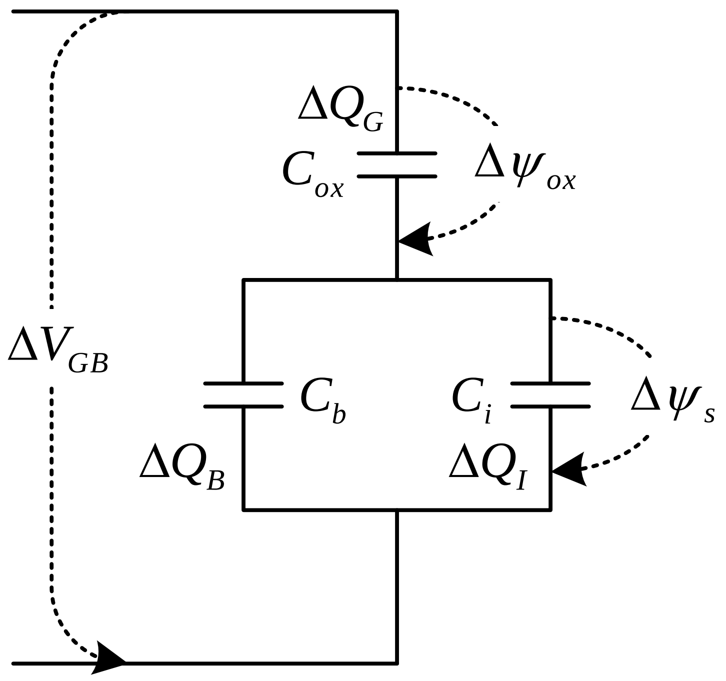
$$C_b^{'} \equiv \frac{-dQ_B^{'}}{d\psi_s}, \quad C_i^{'} \equiv \frac{-dQ_I^{'}}{d\psi_s}$$

とすると、

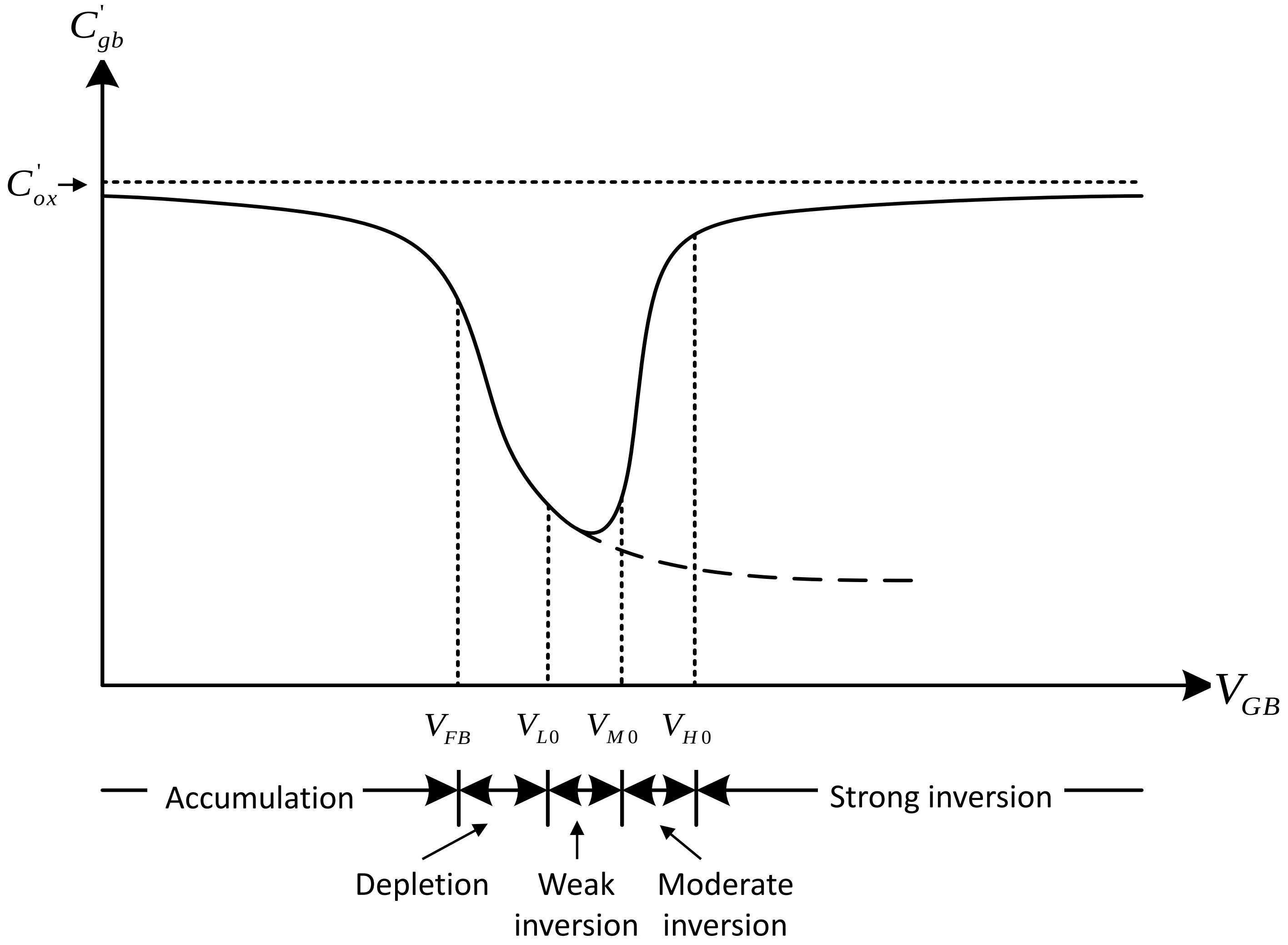
$$C_c^{'} = C_b^{'} + C_i^{'}$$

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

$$V_{GB}=V_{FB}+\psi_s-\frac{Q_I^{'}(\psi_s)+Q_B^{'}(\psi_s)}{C_{ox}^{'}}$$

$$\frac{dV_{GB}}{d\psi_s}=1+\frac{1}{C_{ox}^{'}}\left(C_b^{'}+C_i^{'}\right)$$

$$\therefore\frac{d\psi_s}{dV_{GB}}=\frac{C_{ox}^{'}}{C_{ox}^{'}+C_b^{'}+C_i^{'}}$$

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。

$$C_b^{'}\equiv\frac{-dQ_B^{'}}{d\psi_s}$$

$$C_i^{'}\equiv\frac{-dQ_I^{'}}{d\psi_s}$$

したがって、

$$n\equiv\left(\frac{d\psi_s}{dV_{GB}}\right)^{-1}=1+\frac{C_b^{'}}{C_{ox}^{'}}$$

$$=1+\frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_s}}\cong1+\frac{\gamma}{2\sqrt{\psi_{sa}}}$$

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、$C_{it}^{'}\equiv\dfrac{-dQ_{it}^{'}}{d\psi_s}$　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、

$$C'_{FB}=\lim_{\psi_s\to 0}C'_c$$

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

である。$\psi_s\to 0$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、$\psi_s\to 0$にすると、極限値が求まる。この極限値は、以下となる。

$$C'_{FB}=\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\frac{1+e^{-\frac{2\phi_F}{\phi_t}}}{2\phi_t}}\approx\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\frac{1}{2\phi_t}}=\frac{\varepsilon_s}{\lambda_p}$$

[但し、$\lambda_p=\left(\phi_t\frac{\varepsilon_s}{qN_A}\right)^{\frac{1}{2}}$: デバイ長]

基板不純物密度の導出方法

高周波$C-V$のゲート～基板間の最大容量値$C_{gb\max}$は、

$$C_{gb\max} = C_{ox} \qquad （蓄積状態）$$

である。また、反転層が形成された後の空乏層容量は

$$C_{dm} = \frac{\varepsilon_s}{d_{Bm}} A = \frac{\varepsilon_s}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}}\sqrt{2\phi_F}} A = \frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}}{2\sqrt{2\phi_F}} A \qquad （A：容量面積）$$

である。この場合、ゲート～基板間の最小容量値$C_{gb\min}$は、

$$\frac{1}{C_{gb\min}} = \frac{1}{C_{gb\max}} + \frac{1}{C_{dm}}$$

となる。これから以下を得る。

$$C_{dm} = \frac{C_{gb\max} C_{gb\min}}{C_{gb\max} - C_{gb\min}}$$

測定値$C_{gb\max}$と$C_{gb\min}$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$C-V$から求めた基板不純物密度を用いると、フラットバンド容量は、

$$C_{FB} \approx \sqrt{2q\varepsilon_s N_A}\sqrt{\frac{1}{2\phi_t}}A \qquad （A：容量面積）$$

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、

$$C_{gbFB} = \frac{C_{ox}C_{FB}}{C_{ox}+C_{FB}} = \frac{C_{gb\max}C_{FB}}{C_{gb\max}+C_{FB}}$$

となる。すなわち、

$$\frac{C_{gbFB}}{C_{gb\max}} = \frac{C_{FB}}{C_{gb\max}+C_{FB}}$$

とし、右辺を実測から求めると、$C_{gbFB}/C_{gb\max}$を決定できる。これから、V_{FB}が求まる。