

Si ナノワイヤFETの コンパクトモデル

名取 研二
フロンティア研究センター
東京工業大学

Outline

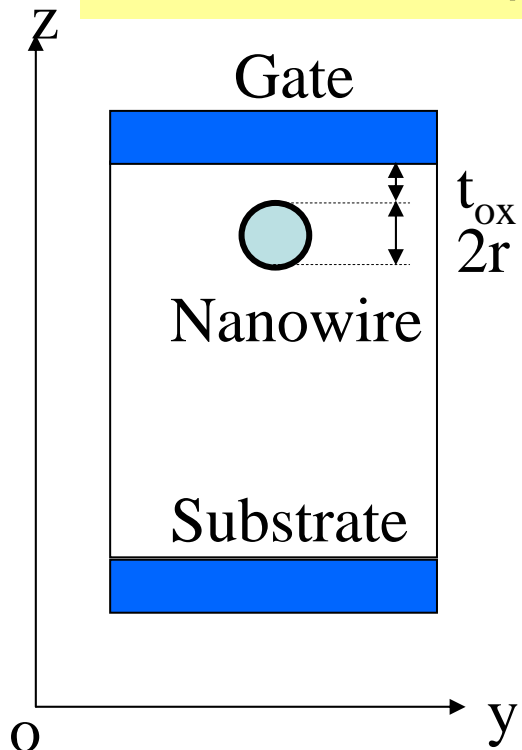
- 背景
- コンパクト・モデルの導出
- Si ナノワイヤMOSFETの特性
- 結論

背景

- ナノスケールMOSの世界は、バリスティック／準バリスティック輸送に近付きつつある
 - 短チャネル化による高性能化は望み薄
 - I_{on} - I_{off} の確保のため、ゲート・コントロール性の向上必要
- 極限構造として **Nanowire MOSFET** に注目が集まる
- 研究の目的
 - Nanowire MOSFET の限界性能・特性を手軽に調べられる、**簡易なコンパクト・モデル**を与える

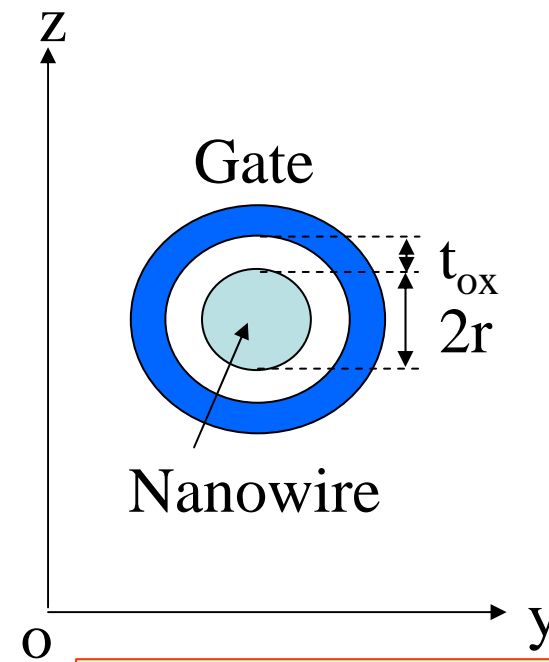
解析したナノワイヤMOSの断面構造

Planar Gate 構造



$$C_G = \frac{2\pi\epsilon_{ox}}{\ln\left\{\frac{\sqrt{2r+t_{ox}} + \sqrt{t_{ox}}}{\sqrt{2r+t_{ox}} - \sqrt{t_{ox}}}\right\}}.$$

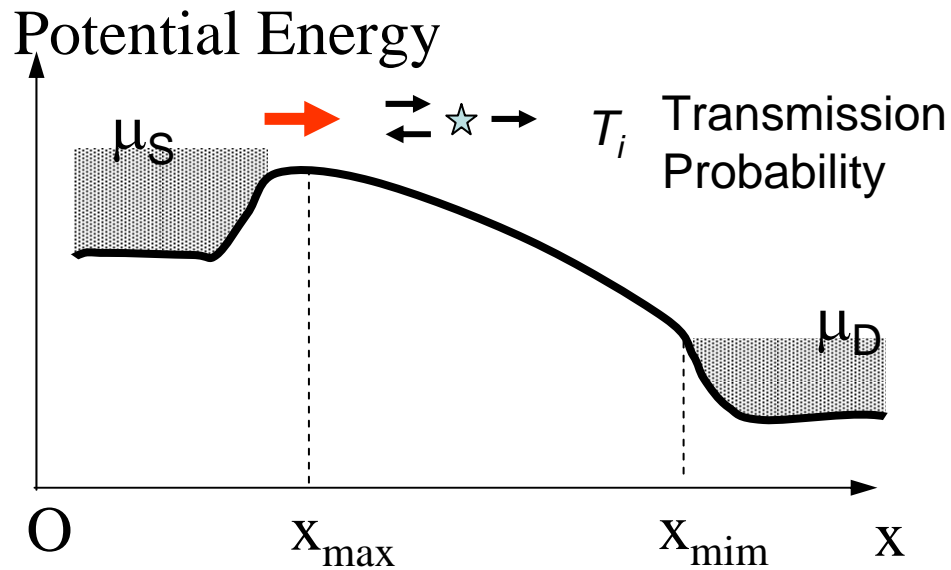
Gate All-Around 構造



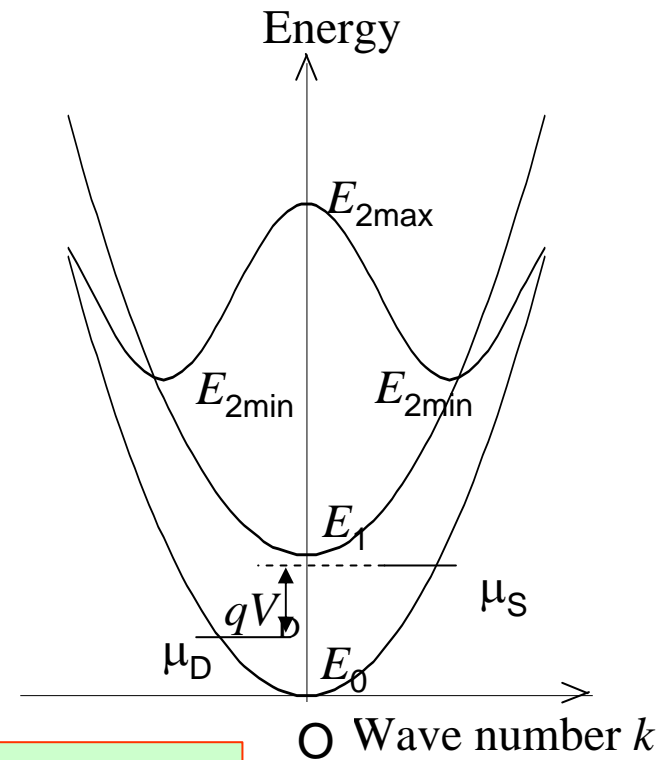
$$C_G = \frac{2\pi\epsilon_{ox}}{\ln\left(\frac{r+t_{ox}}{r}\right)}.$$

Nanowire MOSFET の電流表式

ポテンシャル・プロファイル



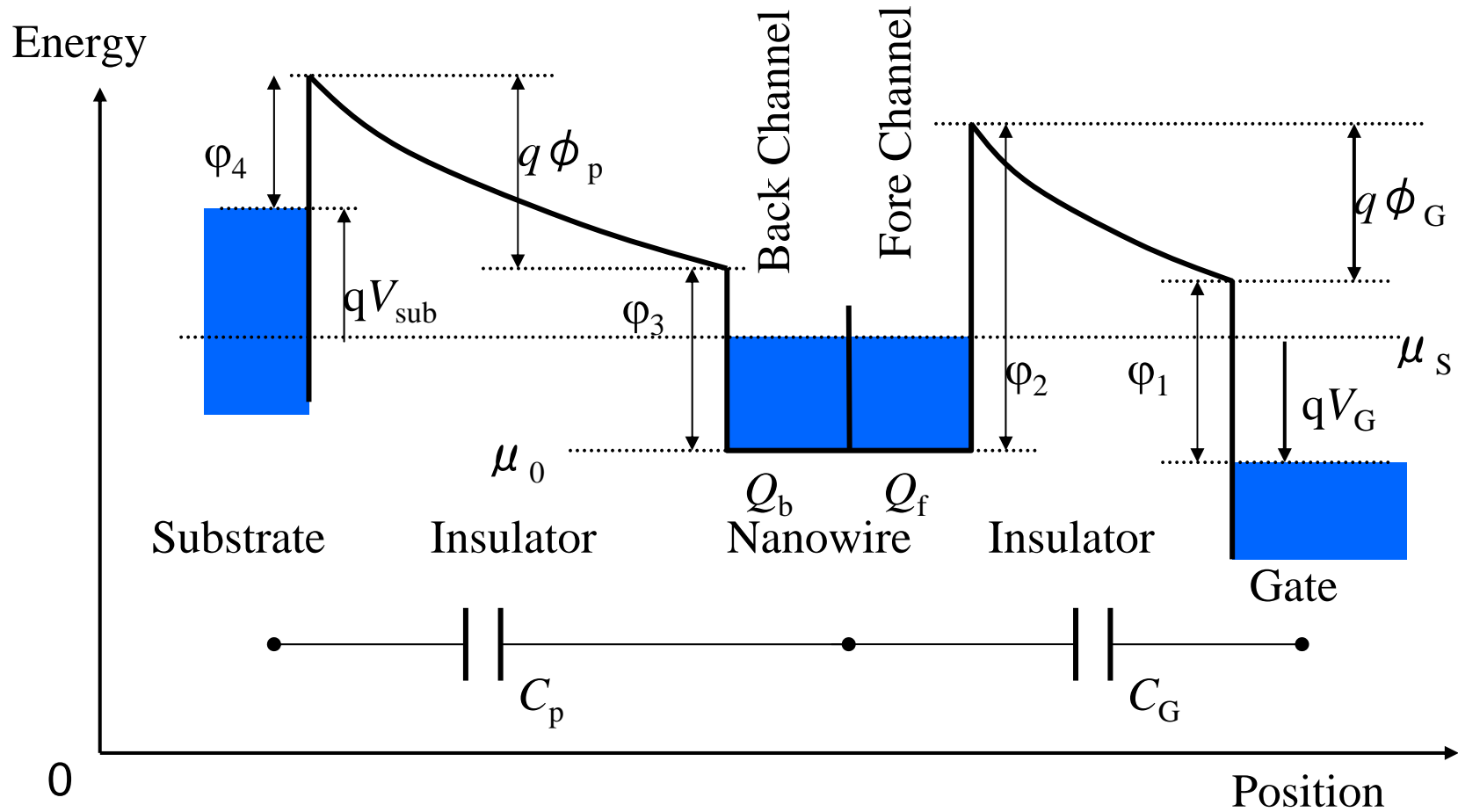
サブバンド構造例



Landauer Formalism

$$I = \frac{q}{\pi \hbar} \sum_i g_i \int [f(\varepsilon, \mu_S) - f(\varepsilon, \mu_D)] T_i d\varepsilon$$

ナノワイヤ、ゲート電極、および基板電極 のエネルギー配置



ナノワイヤまわりの静電関係式

$$Q = Q_f + Q_b = -C_G \phi_G + C_p \phi_p$$

$$q\phi_G = qV_G - (\mu_S - \mu_0) - (\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$q\phi_p = -qV_{sub} + (\mu_S - \mu_0) - (\varphi_3 - \varphi_4)$$

$$(V_G - V_t) - \alpha \frac{\mu_S - \mu_0}{q} = \frac{|Q_f + Q_b|}{C_G}.$$

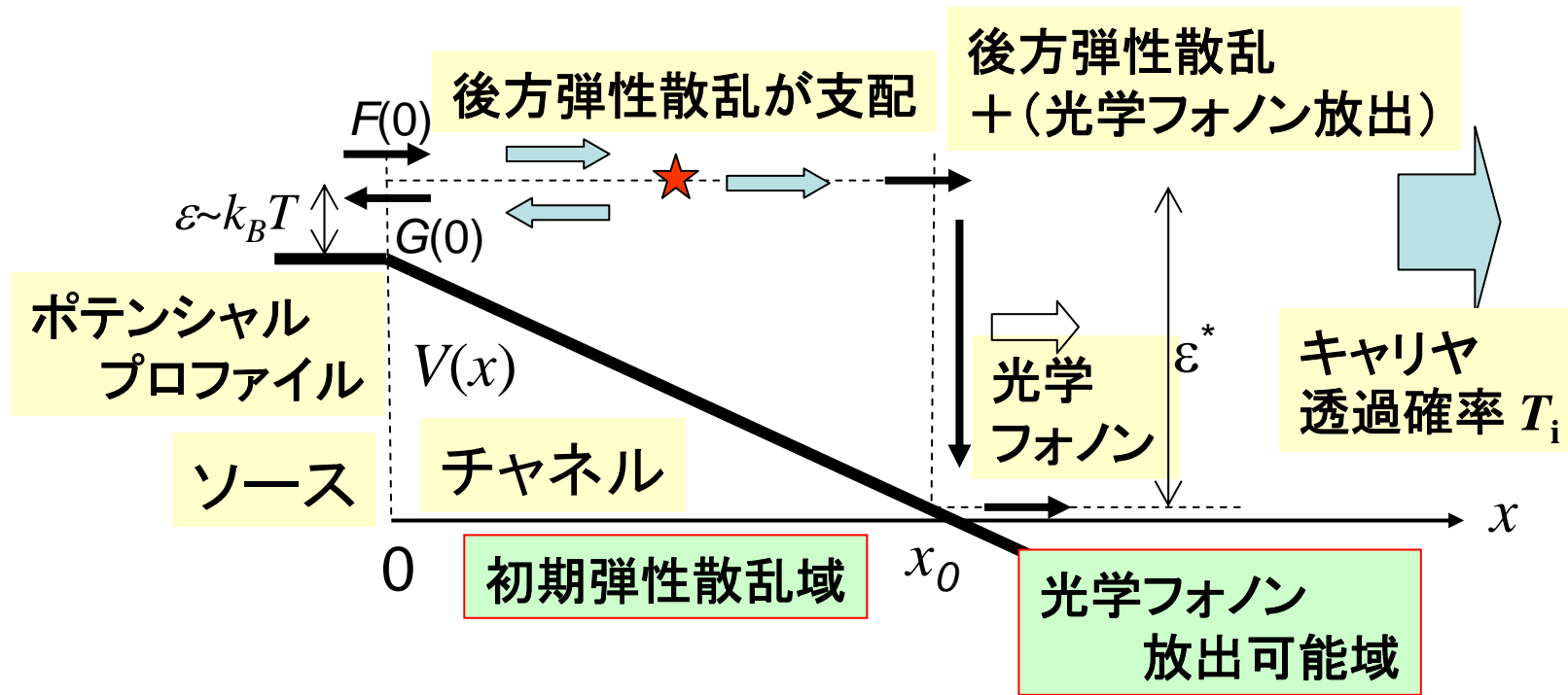
$$\alpha = 1 + \frac{C_P}{C_G}$$

$$V_t = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{q} - \frac{C_p}{C_G} \left(V_{sub} + \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{q} \right)$$

準バリスティック MOSFETへの考え方

散乱モデル

線形ポテンシャル近似 : 電界 E



透過確率

$$T(\varepsilon) = \frac{(F(0) - G(0))}{F(0)}$$

ドレインからの入射=0

弾性散乱域

Boltzmann 方程式

$$\frac{q}{\hbar} E \frac{\partial f(x, k)}{\partial k} + \frac{\hbar k}{m} \frac{\partial f(x, k)}{\partial x} + B \{f(x, k) - f(x, -k)\} = 0$$

□ $F(x)/\hbar$: 正の速度を持つ Flux

□ $G(x)/\hbar$: 負の速度を持つ Flux

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{2(qEx + \varepsilon)}{m}} \frac{dF}{dx} + B(F - G) &= 0 \\ -\sqrt{\frac{2(qEx + \varepsilon)}{m}} \frac{dG}{dx} + B(G - F) &= 0 \end{aligned}$$

Flux 方程式

Back scatt. 確率

$$B = B_0 \frac{1}{\sqrt{qEx + \varepsilon}}$$

1-Dim 状態密度に比例する

弾性散乱域

$$\sqrt{\frac{2}{m}(qEx + \varepsilon)} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{B_0}{\sqrt{qEx + \varepsilon}} \{F(x) - G(x)\} = 0$$

B_0 : 弾性散乱の強度

$$-\sqrt{\frac{2}{m}(qEx + \varepsilon)} \frac{dG(x)}{dx} + \frac{B_0}{\sqrt{qEx + \varepsilon}} \{G(x) - F(x)\} = 0$$

D_0 : エネルギー緩和の強度

光学フォノン放出域

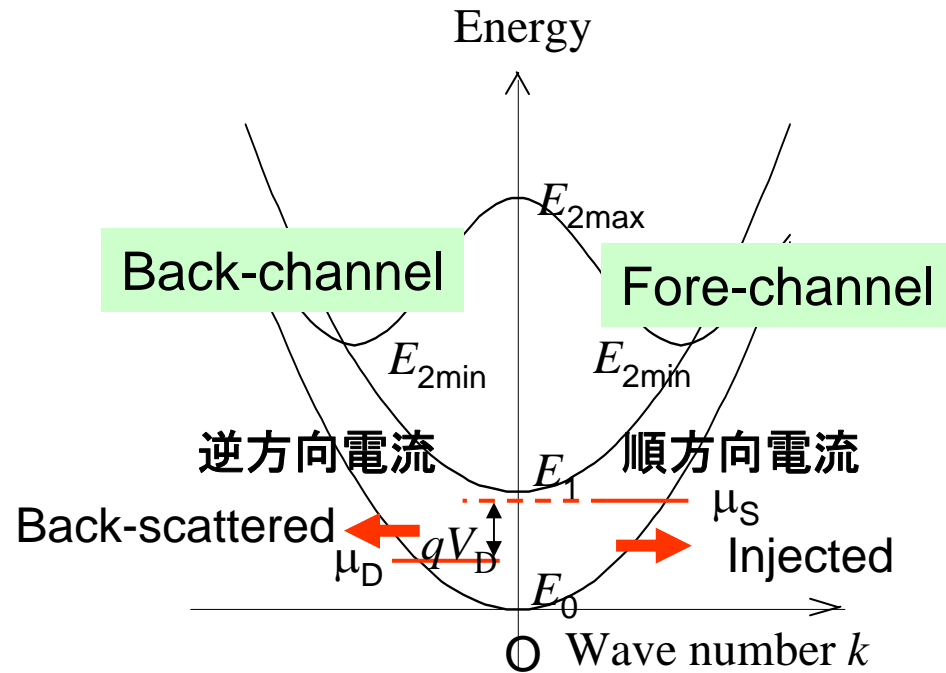
$$\sqrt{\frac{2}{m}(qEx + \varepsilon)} \frac{dF(x)}{dx} + \frac{B_0}{\sqrt{qEx + \varepsilon}} \{F(x) - G(x)\} + \frac{2D_0}{\sqrt{qEx + \varepsilon - \varepsilon^*}} F(x) = 0$$

$$-\sqrt{\frac{2}{m}(qEx + \varepsilon)} \frac{dG(x)}{dx} + \frac{B_0}{\sqrt{qEx + \varepsilon}} \{G(x) - F(x)\} + \frac{2D_0}{\sqrt{qEx + \varepsilon - \varepsilon^*}} G(x) = 0$$

ドレインへの透過確率 (運動エネルギー ε に対する)

$$T(\varepsilon) = \frac{\sqrt{2D_0}qE}{\left(\sqrt{B_0 + D_0} + \sqrt{D_0}\right)qE + \sqrt{2mD_0}B_0 \ln\left(\frac{qEx_0 + \varepsilon}{\varepsilon}\right)}$$

チャンネル入口付近のキャリア電荷量



$$|Q_f + Q_b| = \frac{q}{\pi} \sum_i g_i \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{1 + \exp\left\{\frac{\varepsilon_i(k) - \mu_S}{k_B T}\right\}} - \int_{-\infty}^0 \left\{ \frac{1}{1 + \exp\left\{\frac{\varepsilon_i(k) - \mu_S}{k_B T}\right\}} - \frac{1}{1 + \exp\left\{\frac{\varepsilon_i(k) - \mu_D}{k_B T}\right\}} \right\} T_i(\varepsilon_i(k)) dk \right]$$

コンパクト・モデルのアウトライン

$$I = \frac{q}{\pi \hbar} \sum_i g_i \int [f(\varepsilon, \mu_S) - f(\varepsilon, \mu_D)] T_i d\varepsilon$$

$$C_G = \frac{2\pi \varepsilon_{ox}}{\ln \left\{ \frac{\sqrt{2r+t_{ox}} + \sqrt{t_{ox}}}{\sqrt{2r+t_{ox}} - \sqrt{t_{ox}}} \right\}}$$

プレーナ
ゲート

$$(V_G - V_t) - \alpha \frac{\mu_S - \mu_0}{q} = \frac{|Q_f + Q_b|}{C_G}$$

$$\mu_S - \mu_D = qV_D$$

$$C_G = \frac{2\pi \varepsilon_{ox}}{\ln \left(\frac{r+t_{ox}}{r} \right)}$$

GAA

(静電関係式)

$$|Q_f + Q_b| = \frac{q}{\pi} \sum_i g_i \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{1 + \exp \left\{ \frac{\varepsilon_i(k) - \mu_S}{k_B T} \right\}} - \int_{-\infty}^0 \left\{ \frac{1}{1 + \exp \left\{ \frac{\varepsilon_i(k) - \mu_S}{k_B T} \right\}} - \frac{1}{1 + \exp \left\{ \frac{\varepsilon_i(k) - \mu_D}{k_B T} \right\}} \right\} T_i(\varepsilon_i(k)) dk \right]$$

$$T(\varepsilon) = \frac{\sqrt{2D_0} qE}{\left(\sqrt{B_0 + D_0} + \sqrt{D_0} \right) qE + \sqrt{2mD_0} B_0 \ln \left(\frac{qEx_0 + \varepsilon}{\varepsilon} \right)}$$

(サブバンドへの
キャリア分布)

未知数 : $I_D, (\mu_S - \mu_0), (\mu_D - \mu_0),$ および $(Q_f + Q_b)$

Si ナノワイヤのサブバンド構造

“1.34nm[□] Si ナノワイヤ (7×7 atoms)”のサブバンド構造

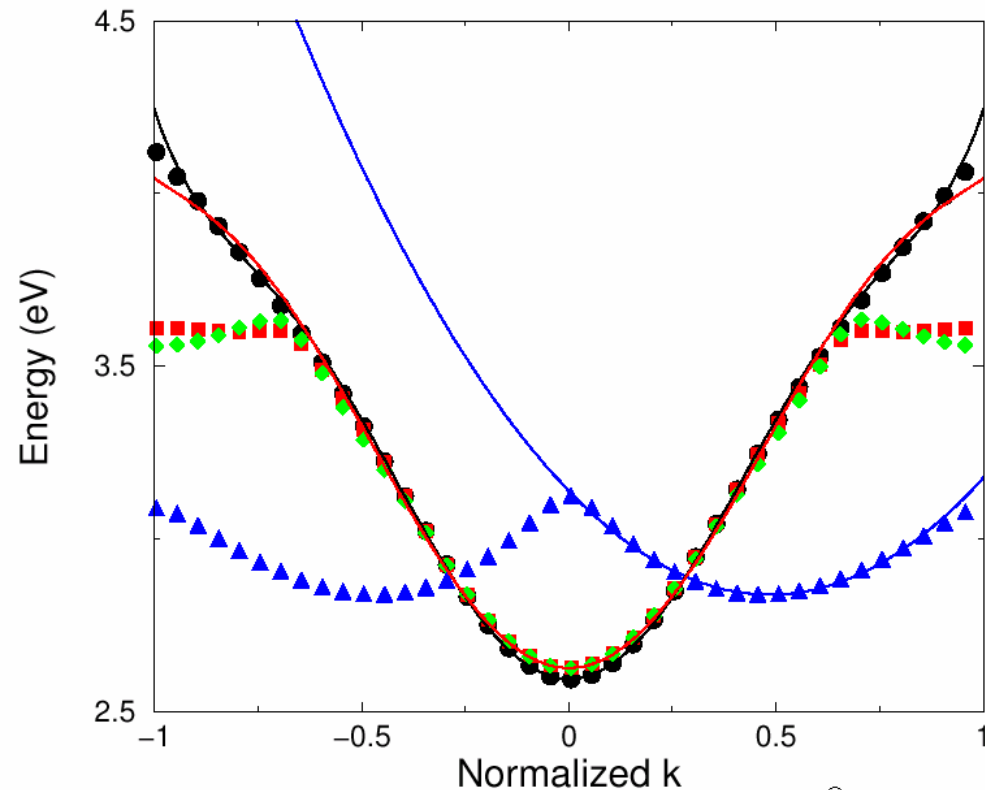
Reported by E. Gnani et al. IEEE ED vol. 54, pp. 2243, 2007

- Lowest subband : **single**, Excited subbands : **3-fold degenerate**
- Effective mass : $\sim 0.3m_0$

$$\gamma_0 \equiv (\hbar k)^2 / 2m$$

$$E_0(k) = \left(\frac{\gamma_0}{0.31}\right) - 0.3\left(\frac{\gamma_0}{0.31}\right)^2 + 0.0375\left(\frac{\gamma_0}{0.31}\right)^3,$$

$$E_1(k) = 0.0327 + \left(\frac{\gamma_0}{0.36}\right) - 0.258\left(\frac{\gamma_0}{0.36}\right)^2 + 0.025\left(\frac{\gamma_0}{0.36}\right)^3.$$



MOSFET 構造

□ Gate All-Around 構造

- 便宜上、正方形断面積ナノワイヤのサブバンドを用いたため、同一断面積の円筒型ワイヤを想定 ($2r=1.51\text{nm}$)

- 基板電極は無いとする

□ ゲート誘電体膜 : 1 nm oxide

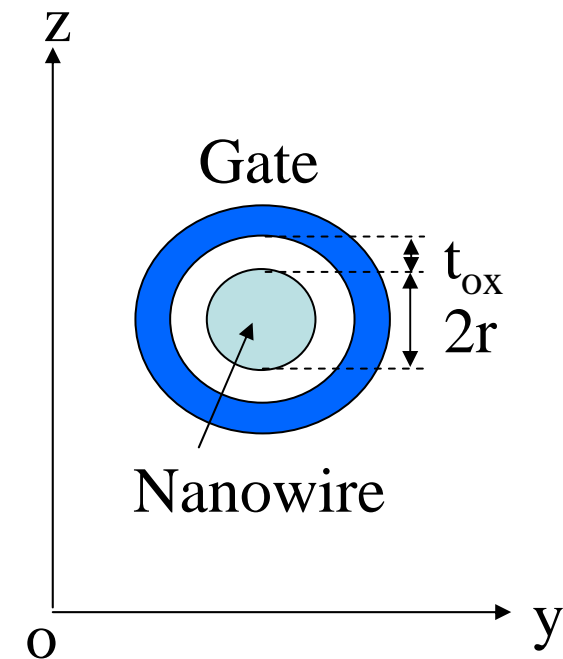
結局 : $C_G=2.57\text{ pF/cm}$, $C_p=0$

□ $L=20\text{ nm}$

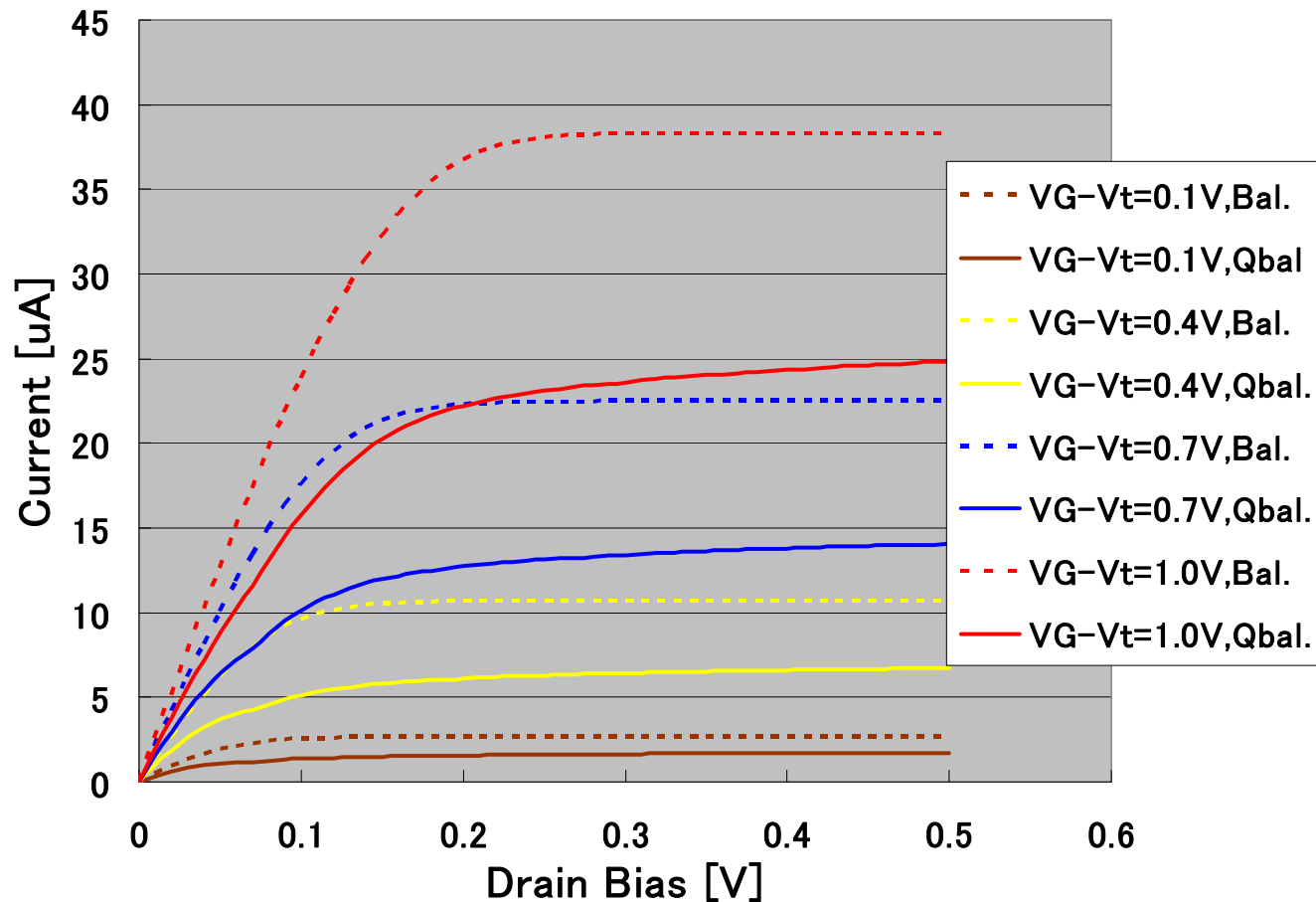
□ キャリヤ散乱

- $B_0=8.07 \times 10^{11}(\text{eV})^{1/2}\text{s}^{-1}$ ($\mu=700\text{ cm}^2/\text{Vs}$ と同等)

- $D_0=6.27 \times 10^{11}(\text{eV})^{1/2}\text{s}^{-1}$ (~散乱時間 : $4 \times 10^{-13}\text{ s}$)



I- V_D 特性 (RT)



- 電流値 Ballistic 38 μA 準Ballistic 20~25 μA
- V_D が増大しても飽和しない

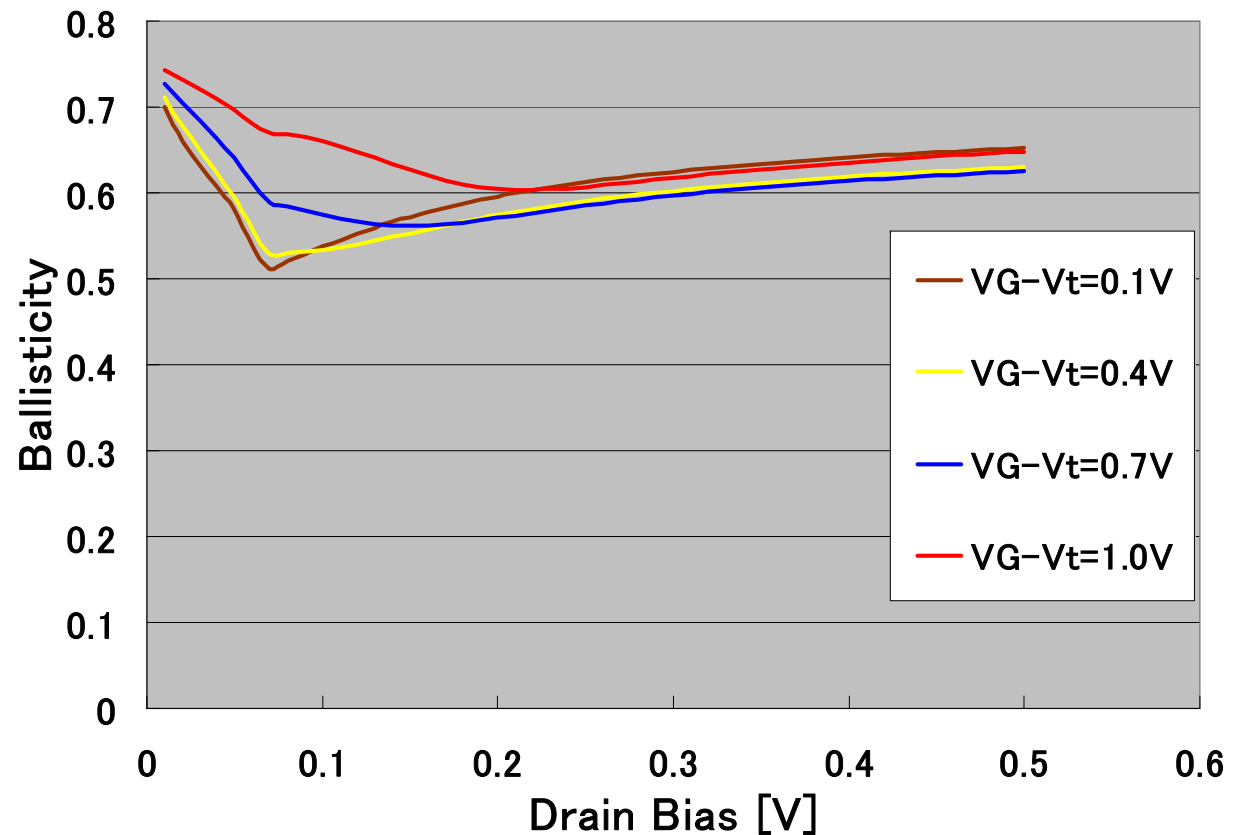
Ballisticity — V_D 関係

Ballisticity

$$\left(\frac{I_{Quasi-ballistic}}{I_{Ballistic}} \right)$$

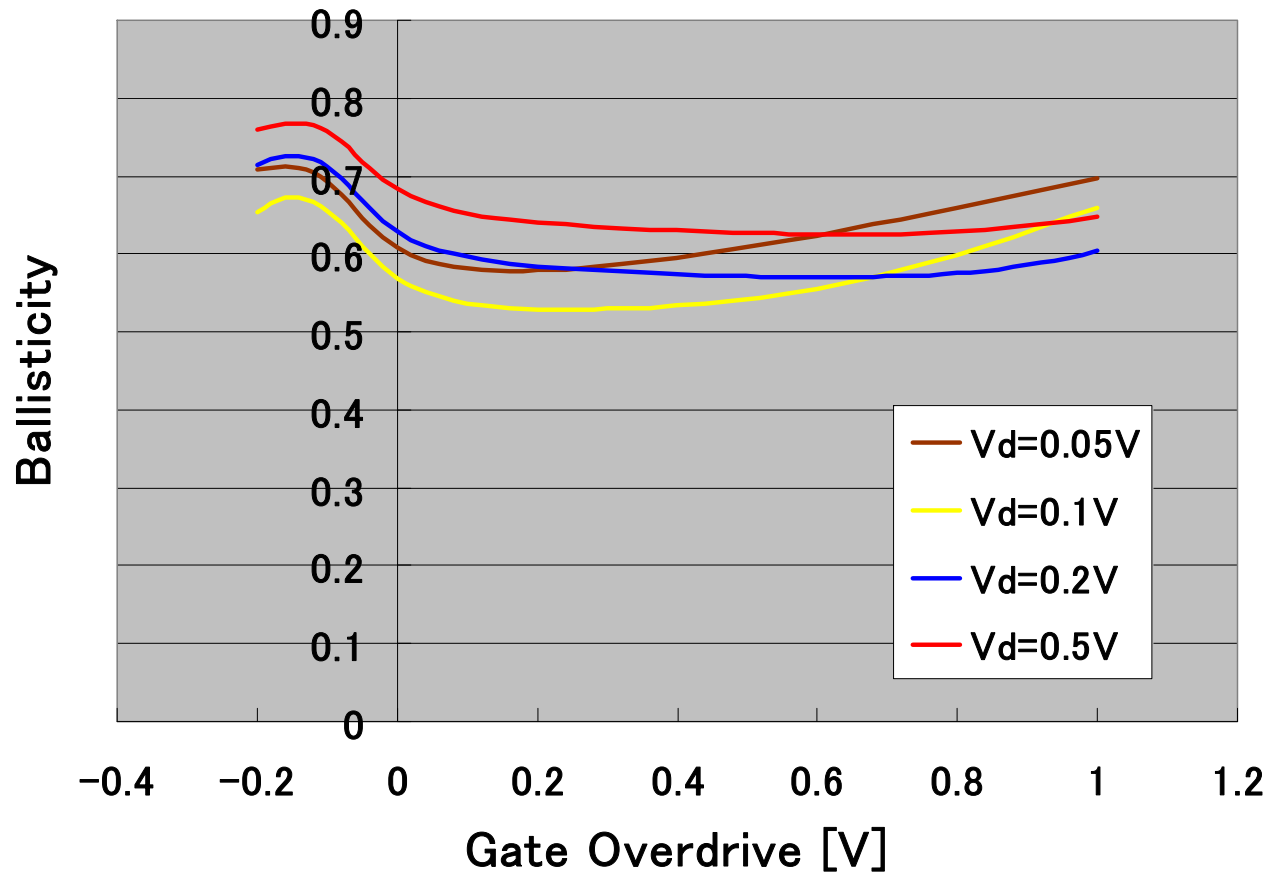
“散乱の効果”。

を表す



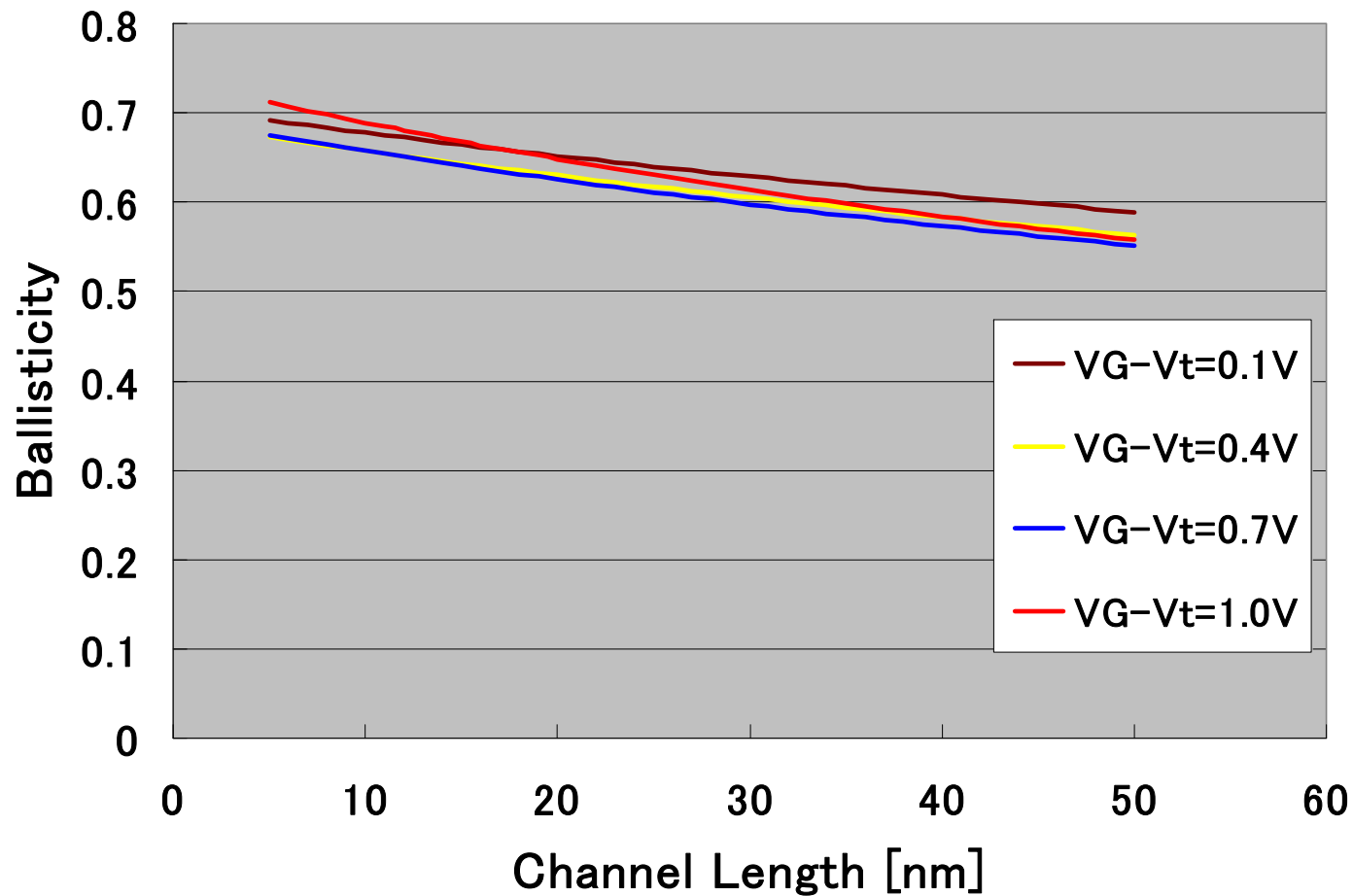
- Ballisticity は ~ 60%.
- V_D の増大に伴い、Ballisticity 線形領域で減少し、飽和領域では増大する.

Ballisticity - Gate Overdrive ($V_G - V_t$) 関係 (RT)



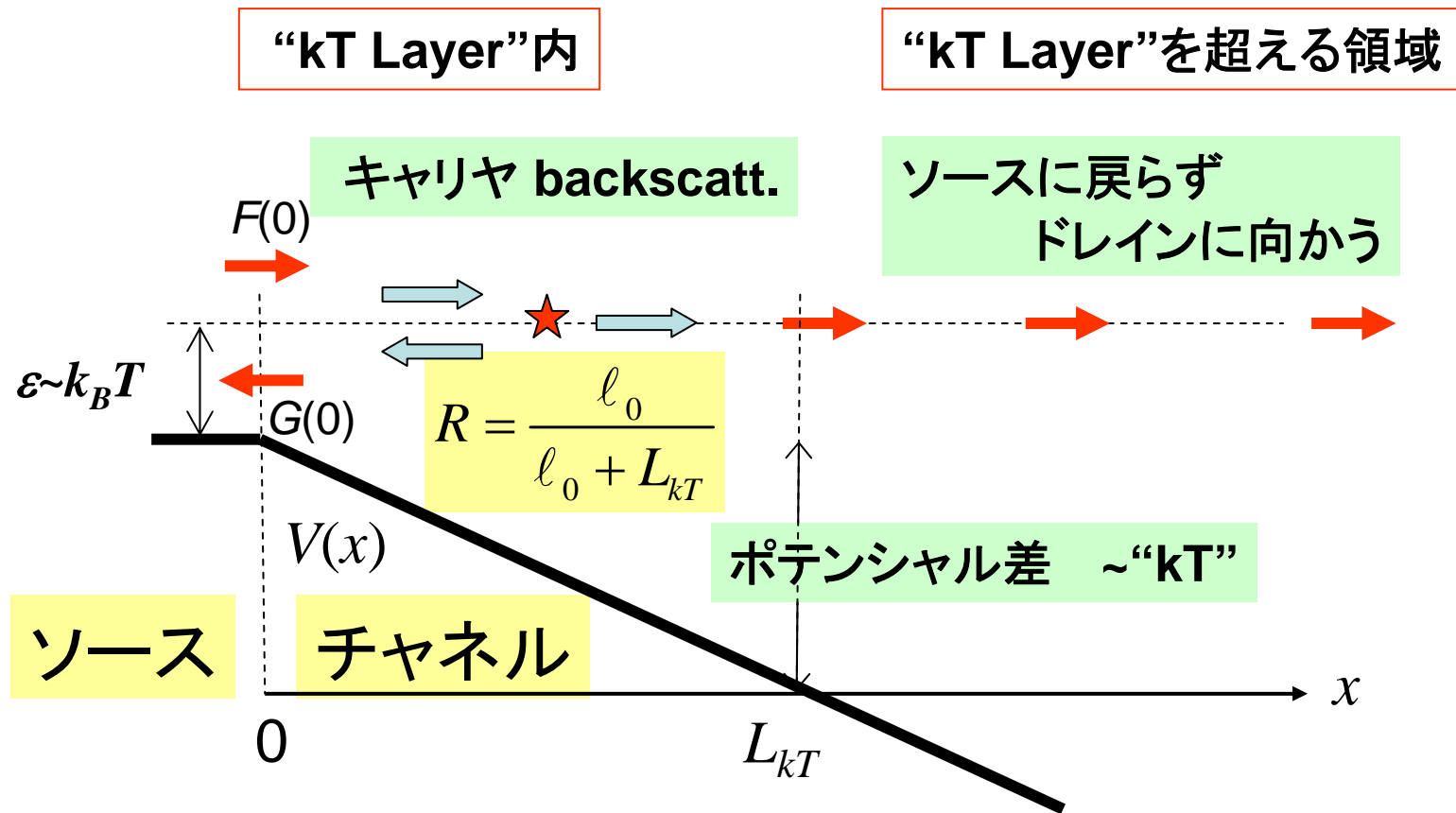
- 強反転では、60%程度でほぼ一定
- 弱反転域では、強反転に比べ増大

Ballisticity と チャンネル長



- Lの減少に伴い、Ballisticity は緩慢に改善.
- L=5 nmでも、ほぼ 70% 程度に止まる

キャリア輸送の物理 (“kT Layer” 理論)



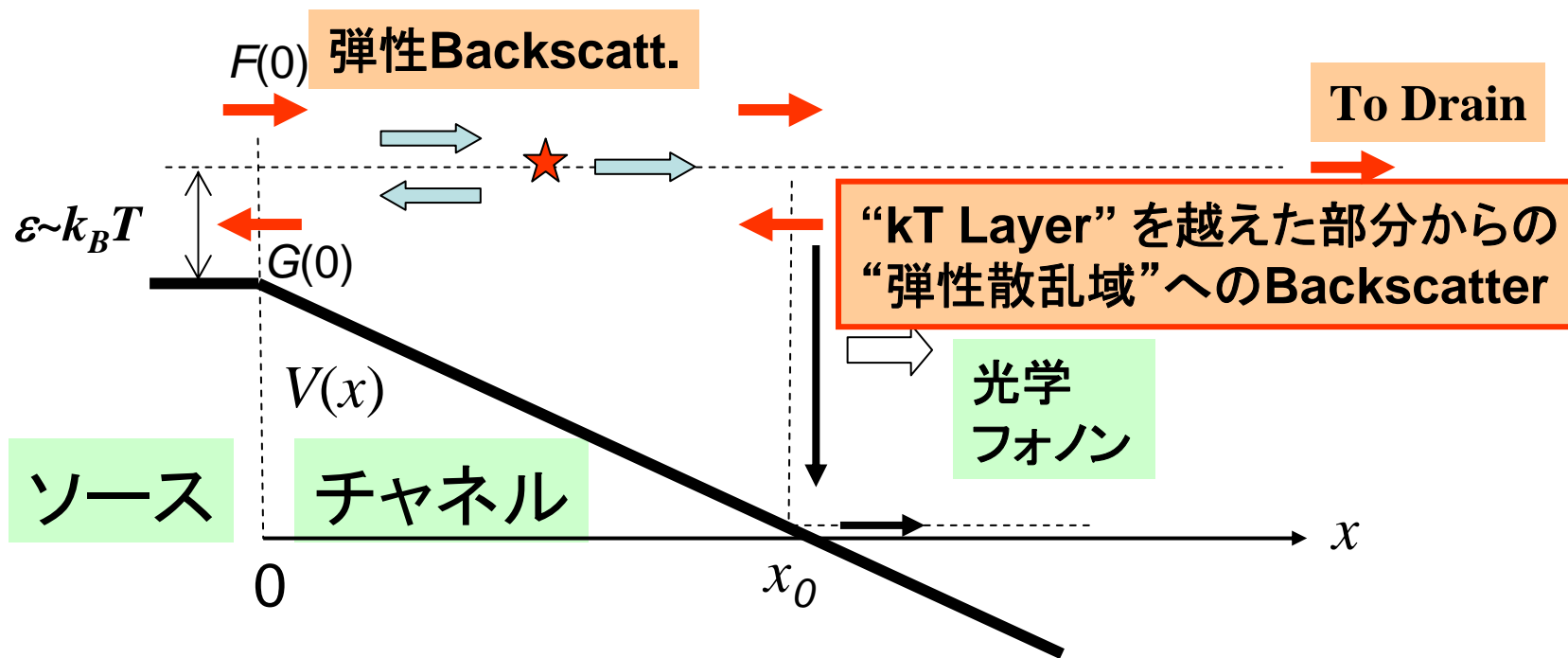
キャリア輸送の物理 (今回のアプローチ)

初期弾性散乱域

光学フォノン放出可能域

Effective “kT Layer”

“弾性 Backscatt.”と
エネルギー緩和の競合



Summary

- 準バルスティック Si ナノワイヤMOSFETのコンパクトモデルを提案した.
- 電流レベル：20~25 μA . 電流は飽和せず増大する.
- 散乱の効果を表すBallisticityの値は、 $\sim 60\%$. その値は印加されるバイアス電圧の変化にあまり依らない.
- チャンネル長が短くなるにつれてBallisticityの値は改善する、しかし、室温では $L \approx 5 \text{ nm}$ にしても $\sim 70\%$ 程度に止まる.
- “kT layer” 理論の形を用いて、FET内のキャリア輸送の物理を論じた. 通常用いられる“kT layer” 理論との差異を明らかにした.