

微細MOSFETにおける ランダム・テレグラフ・シグナルの 統計的ばらつきモデリング

園田 賢一郎

(株) ルネサステクノロジ

概要

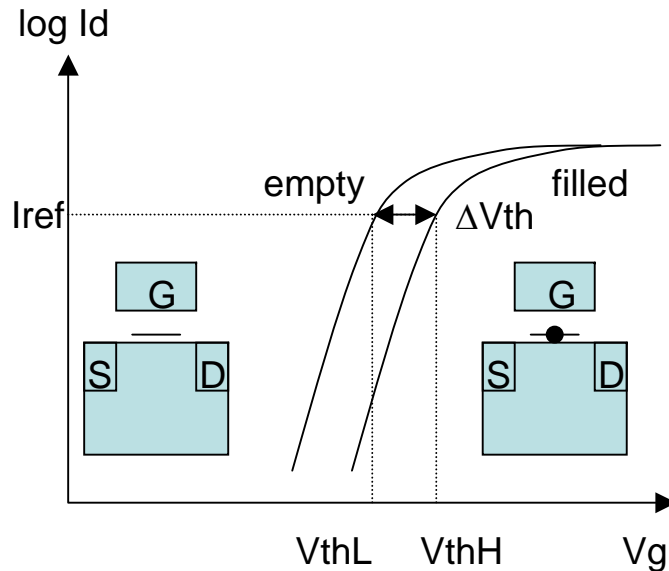
- 基板内の離散不純物効果によって, RTS による V_{th} シフト量 ΔV_{th} が統計的にばらつく.
- ΔV_{th} のばらつきは対数正規分布に従う.
- RTS は 50nm ノード以降のフラッシュメモリの動作に深刻な影響を与える可能性がある.

発表内容

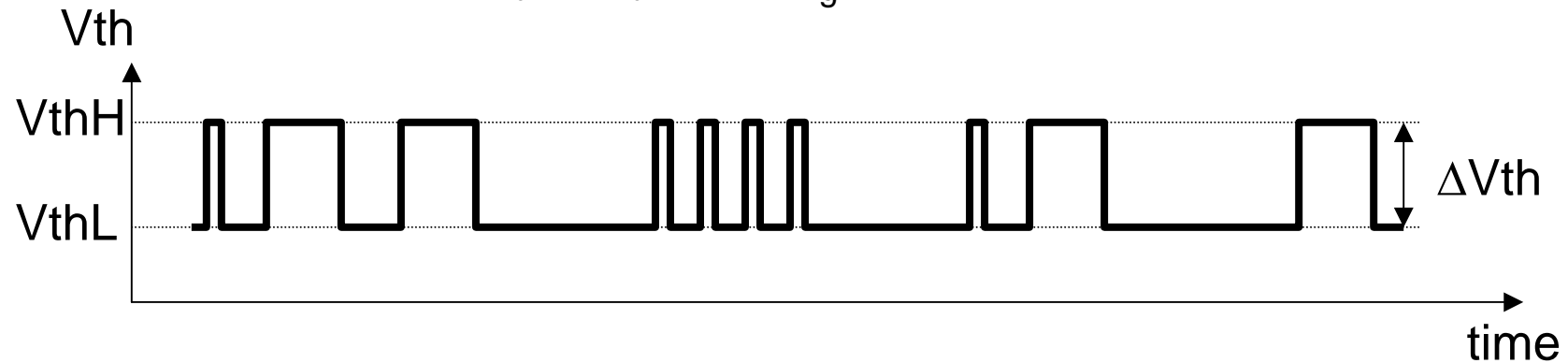
1. はじめに
2. モデリング
3. 計算結果
4. まとめ

1. はじめに

ランダム・テレグラフ・シグナル (RTS) とは?



トラップへのキャリアの
出入りによって、離散的
に変化する信号



ΔV_{th} は RTS による V_{th} の変動量と定義

従来の ΔV_{th} モデルの限界

ΔV_{th} の測定値は分布を持ち、
従来モデル

$$\Delta V_{th} = q / (C_{ox} W_{eff} L_{eff})$$

の計算値の数倍になる場合がある。

“... a random distribution of potential peaks and troughs giving rise to an *inhomogeneous* channel resistance.

... some (traps) are more strategically placed than others.”

Uren *et al.* APL 1985

- 不均一チャネルが ΔV_{th} のばらつきの要因となる。
- 信頼性評価のためには、 ΔV_{th} の統計分布を表すモデルが必要。

従来モデルの計算値

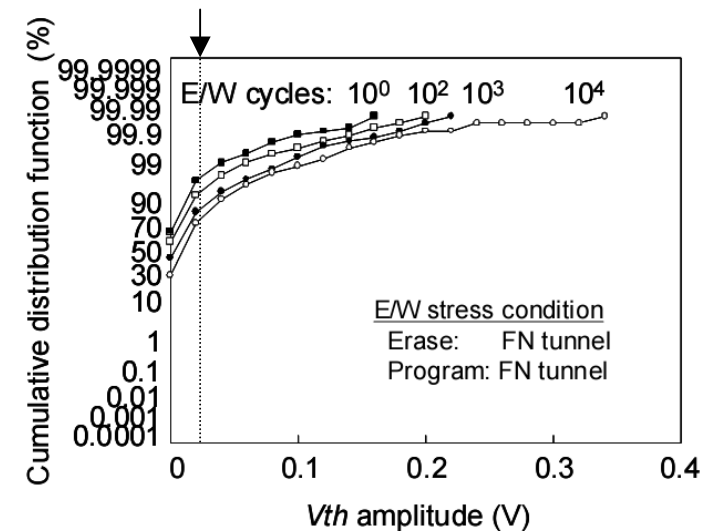
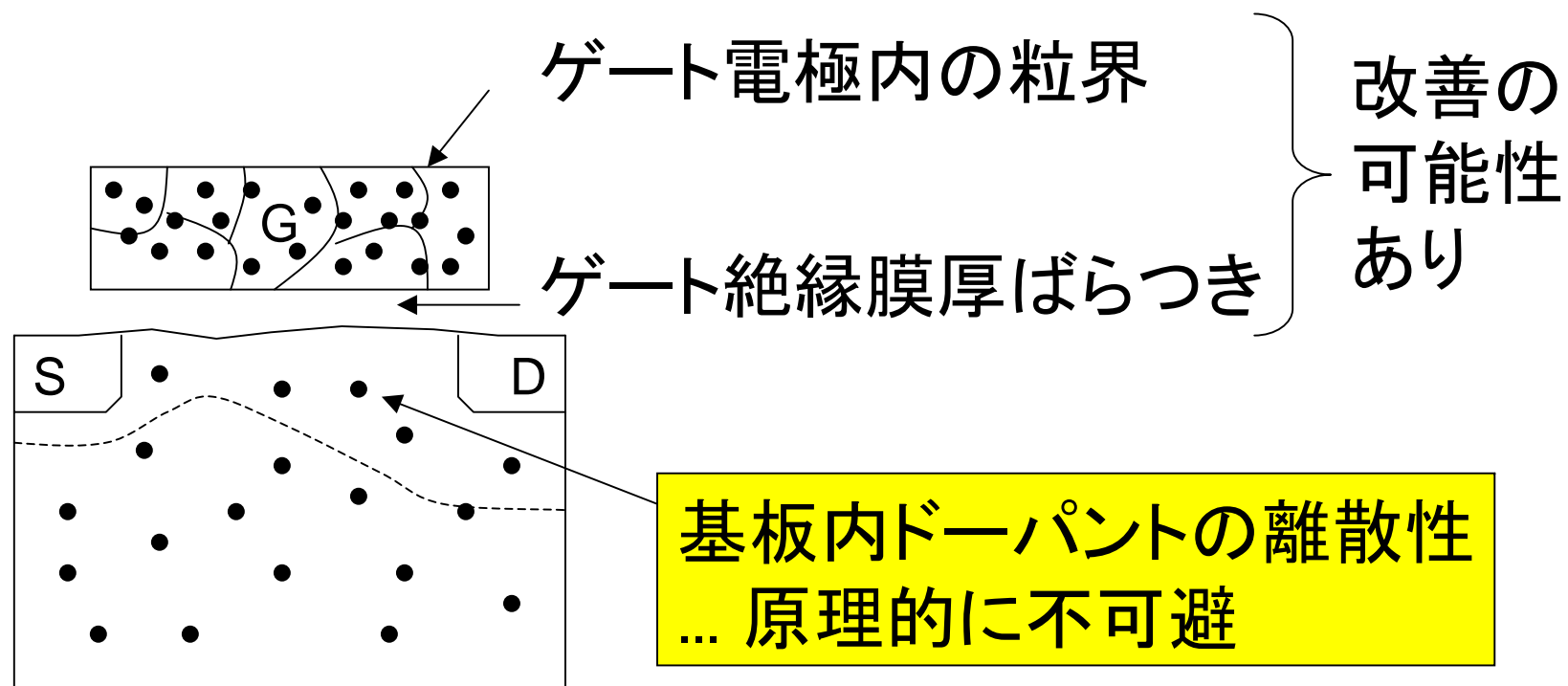


Fig. 7 V_{th} amplitude due to RTS increases as E/W cycles.

フラッシュメモリでの ΔV_{th} の測定値
(H.Kurata *et al.*
VLSI Circ. Symp. 2006)

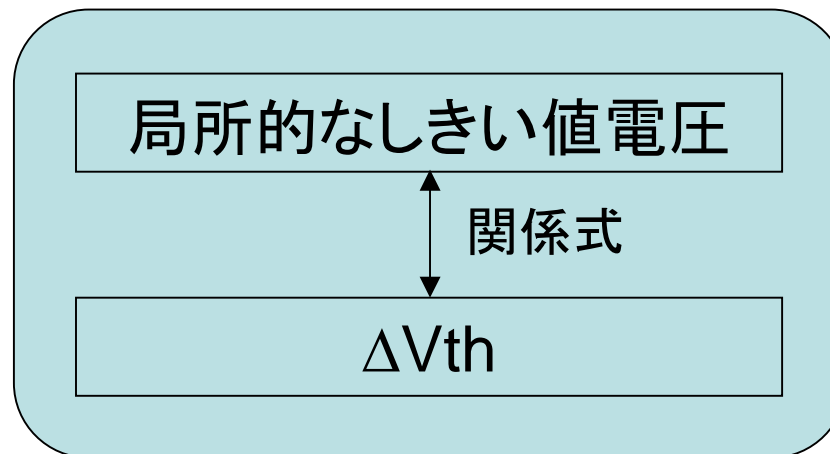
不均一チャネルの原因



本発表では、不均一チャネルの原因として
基板内ドーパントの離散性のみ考慮

2. モデリング

“局所的なしきい値” を使用して
 ΔV_{th} ばらつきをモデリング



+

離散不純物分布による表面ポテンシャルのゆらぎ

||

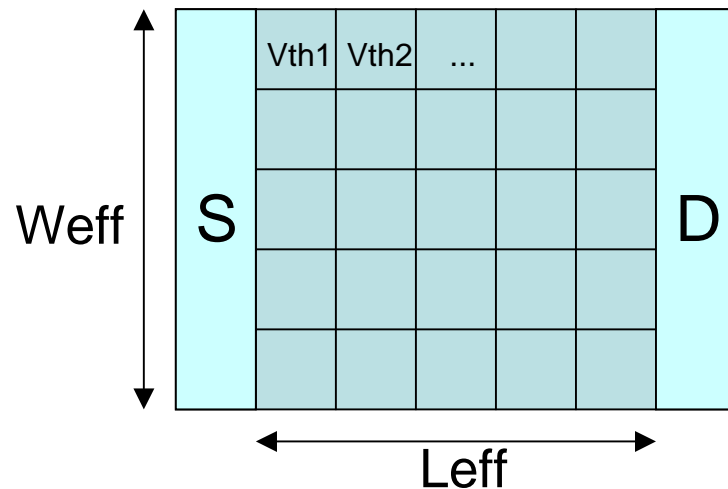
ΔV_{th} ばらつきモデル

局所的なしきい値電圧

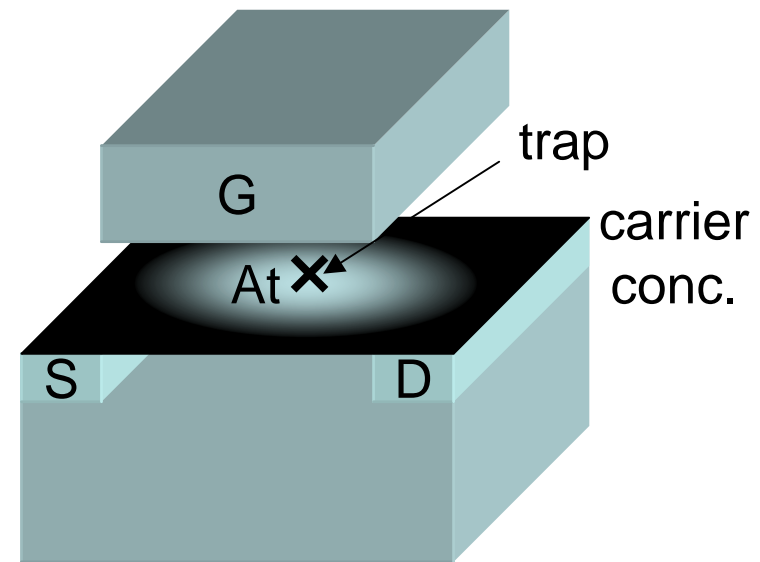
チャンネルを微小セルに分割し, 各セルに対して

V_{thi} : 局所的なしきい値電圧

$N_i = N_0 \cdot \exp((V_{gs} - V_{thi})/nkT)$: 局所的なキャリア濃度を定義 (i はセルの番号)

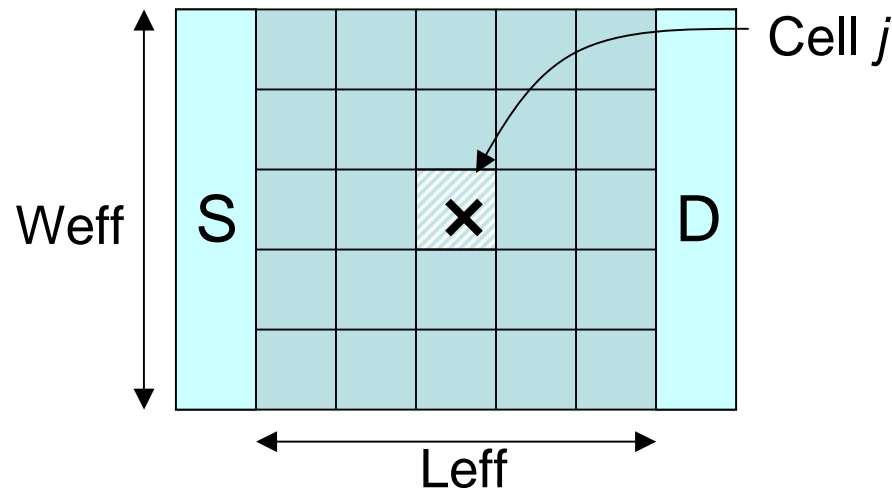


チャンネルを面積 A_t の微小なセルに分割



面積 A_t はトラップされたキャリアが影響を及ぼす範囲

局所的なしきい値電圧と ΔV_{th} との関係



セル j にトラップが存在すると想定

セル j の局所的なしきい値電圧の変動量

$$\Delta V_{thj} = q / (C_{ox} * A_t)$$

全体的なしきい値電圧の変動量

$$\Delta V_{th} = \underbrace{q / (C_{ox} * W_{eff} * L_{eff})}_{\text{従来モデル}} * \exp(- \underbrace{q (V_{thj} - V_{th}) / n * k * T}_{\text{局所的なしきい値電圧と全体的なしきい値電圧との差}})$$

従来モデル

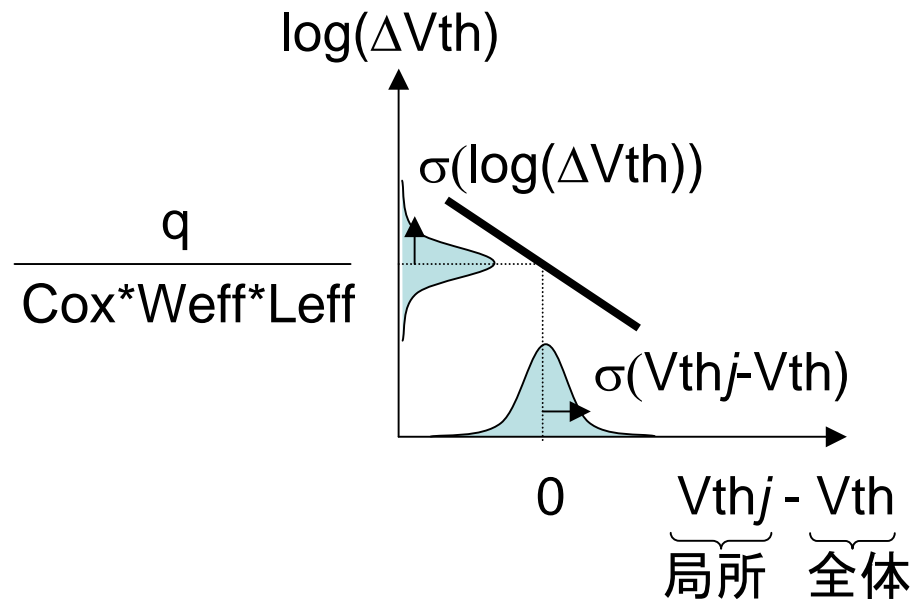
局所的なしきい値電圧と
全体的なしきい値電圧との差

従来モデルとの関係

$$\Delta V_{th} = \underbrace{q / (C_{ox} * W_{eff} * L_{eff})}_{\text{従来モデル}} * \underbrace{\exp(- q (V_{thj} - V_{th}) / n * k * T)}_{\text{局所的なしきい値電圧と全体的なしきい値電圧との差}}$$

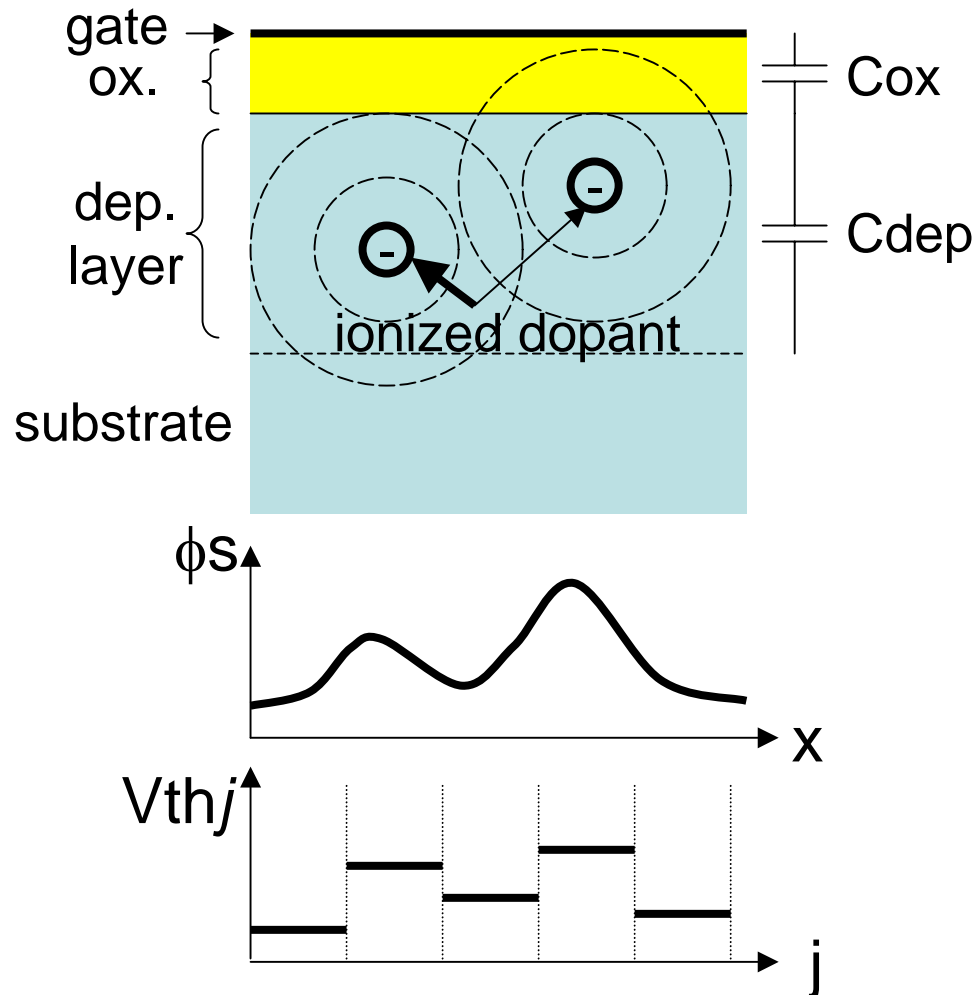
従来モデル

局所的なしきい値電圧と
全体的なしきい値電圧との差



- ΔV_{th} のメジアンは従来モデルと一致
- $\log(\Delta V_{th})$ の標準偏差は $V_{thj} - V_{th}$ の標準偏差に比例

局所的なしきい値電圧のゆらぎ

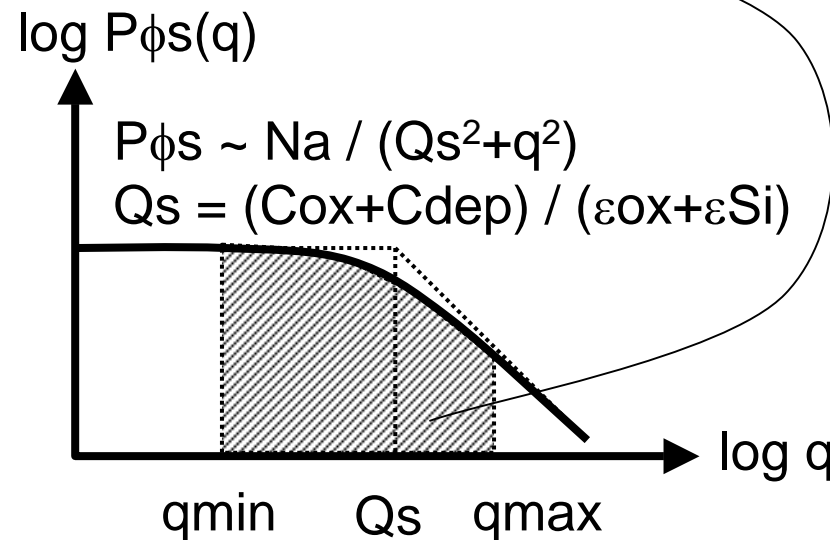


離散不純物分布により局所的なしきい値電圧にゆらぎが生じる

局所的なしきい値電圧のゆらぎの標準偏差

局所的なしきい値電圧 V_{thj} のゆらぎの標準偏差

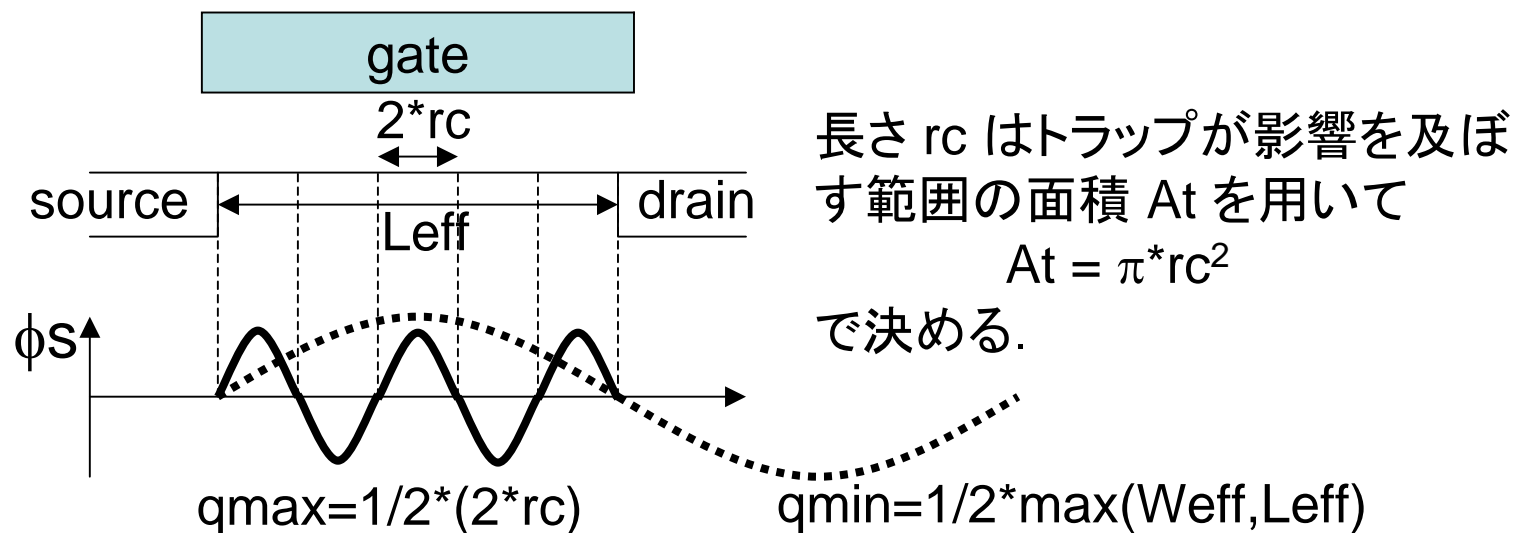
$$\sigma(V_{thj} - V_{th}) \sim \sigma(\phi_s)$$



局所的なしきい値電圧に寄与する空間周波数範囲で積分

表面ポテンシャル ϕ_s の
パワースペクトル P_{ϕ_s} と
空間周波数 q との関係
Slavcheva *et al.* JAP 2002

表面ポテンシャルの空間周波数



q_{min} から q_{max} までの表面ポテンシャルゆらぎが局所的なしきい値電圧のゆらぎに寄与

ΔV_{th} ばらつきモデル

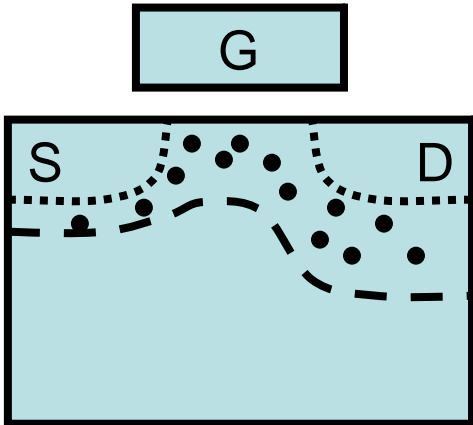
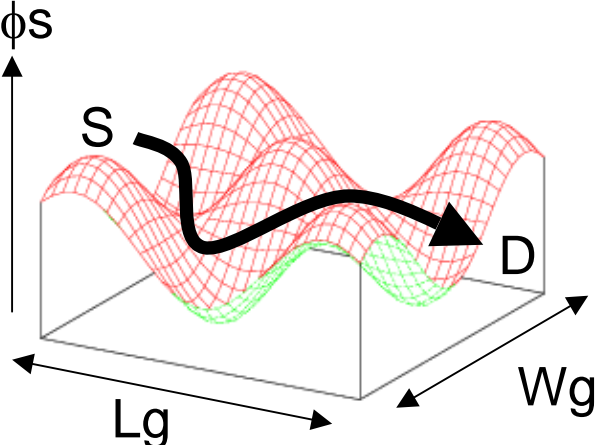
局所的なしきい値電圧 V_{thj} と
 ΔV_{th} との関係
 $\log(\Delta V_{th}) \sim \sigma(V_{thj} - V_{th})$

離散不純物分布による
局所的なしきい値電圧のゆらぎ
 $\sigma(V_{thj} - V_{th}) \sim \sigma(\phi_s)$

ΔV_{th} ばらつきモデル
 $\log(\Delta V_{th}) \sim \sigma(\phi_s)$

ϕ_s のゆらぎが正規分布に従うと仮定すると,
 ΔV_{th} のばらつきは対数正規分布に従う

V_{th}, ΔV_{th} ばらつきモデルの比較

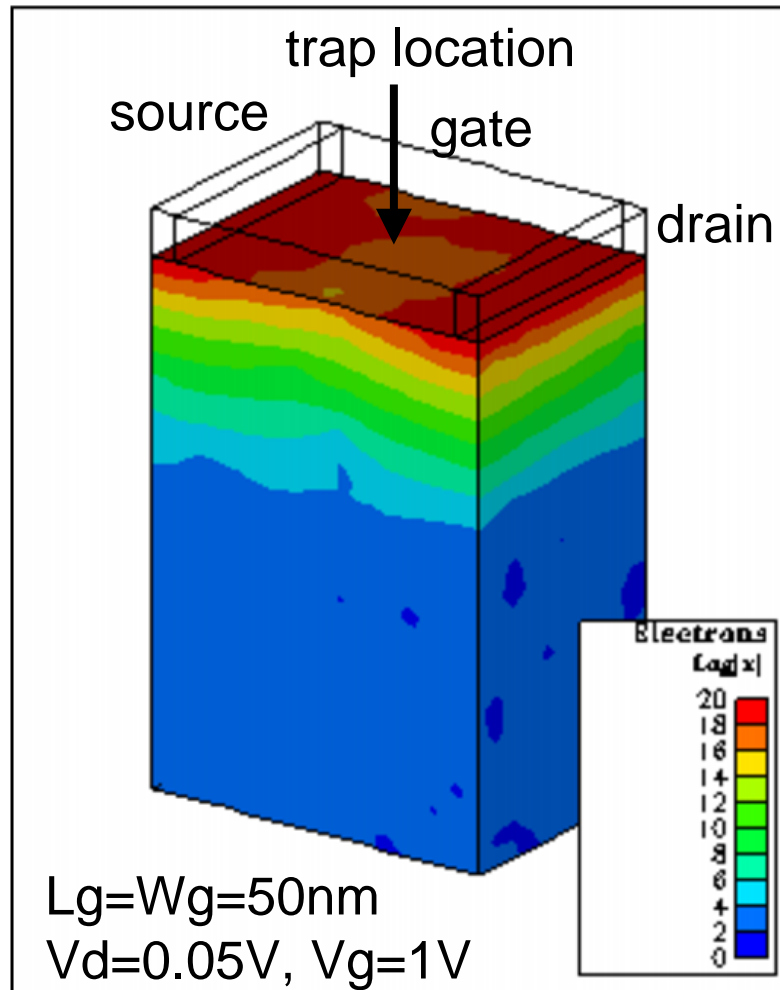
	V _{th} ばらつき	ΔV _{th} ばらつき
主要因	空乏層内の不純物数ゆらぎ 	表面ポテンシャルゆらぎ 
分布	正規分布	対数正規分布

V_{th}, ΔV_{th} とも離散不純物分布によってばらつく

3. 計算結果

- 3D デバイスシミュレーションとの比較
- 測定値との比較
- 基板不純物濃度依存性
- スケーリングに与える影響

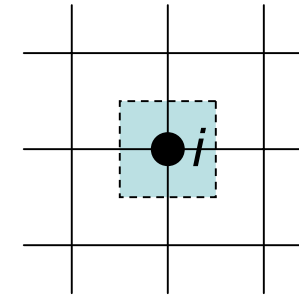
3D デバイスシミュレーションとの比較



- 30 通りの不純物原子配置を乱数で発生
- トラップされた電子の有無による V_{th} の変化を計算

不純物濃度の設定方法

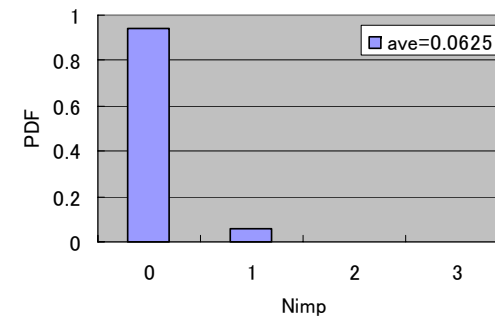
1. 節点 i の CV (体積 V) に含まれる
平均不純物原子個数 $Na \cdot V$ を計算



2. 平均 $Na \cdot V$ の Poisson 分布に従う
乱数を発生させ, CV に含まれる
不純物原子個数 N_{imp} を設定

節点 i のコントロール
ボリューム (CV)

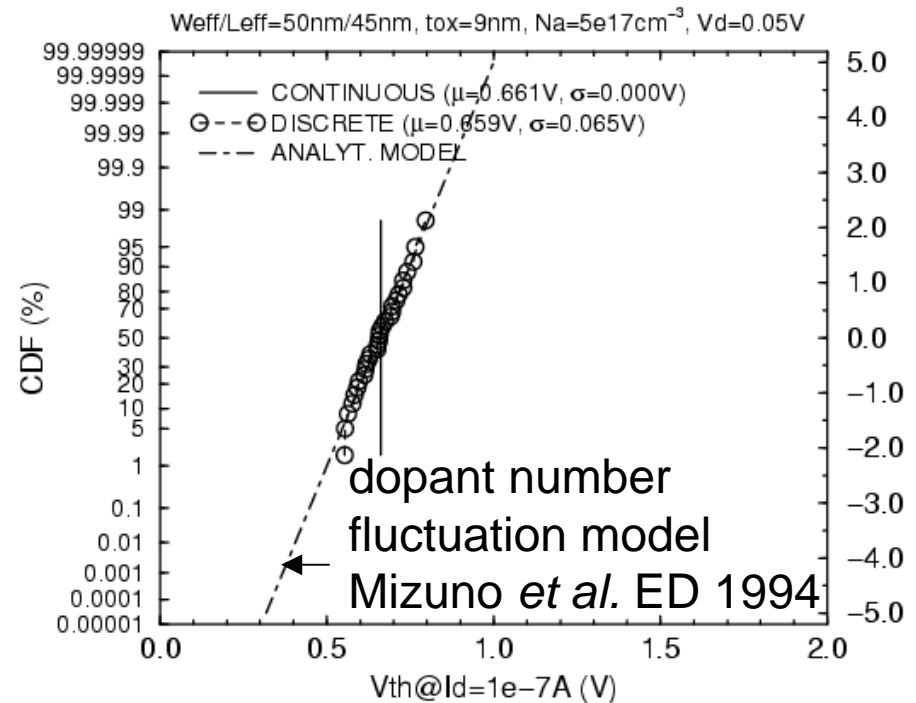
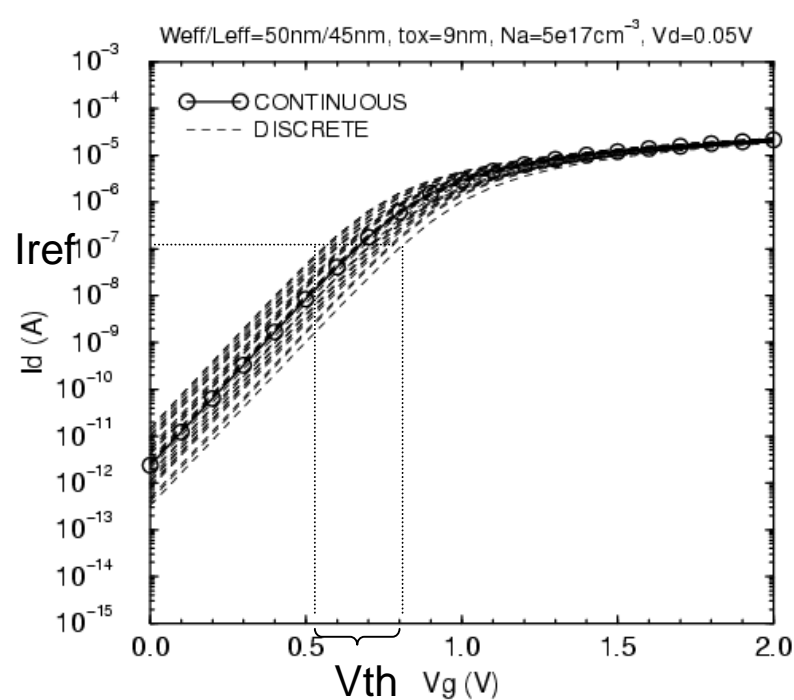
3. 節点 i の不純物濃度を N_{imp}/V に
設定



Poisson分布の例
($Na=5e17cm^{-3}$, $V=(5nm)^3$,
 $Na \cdot V=0.0625$)
大部分は 0 あるいは 1

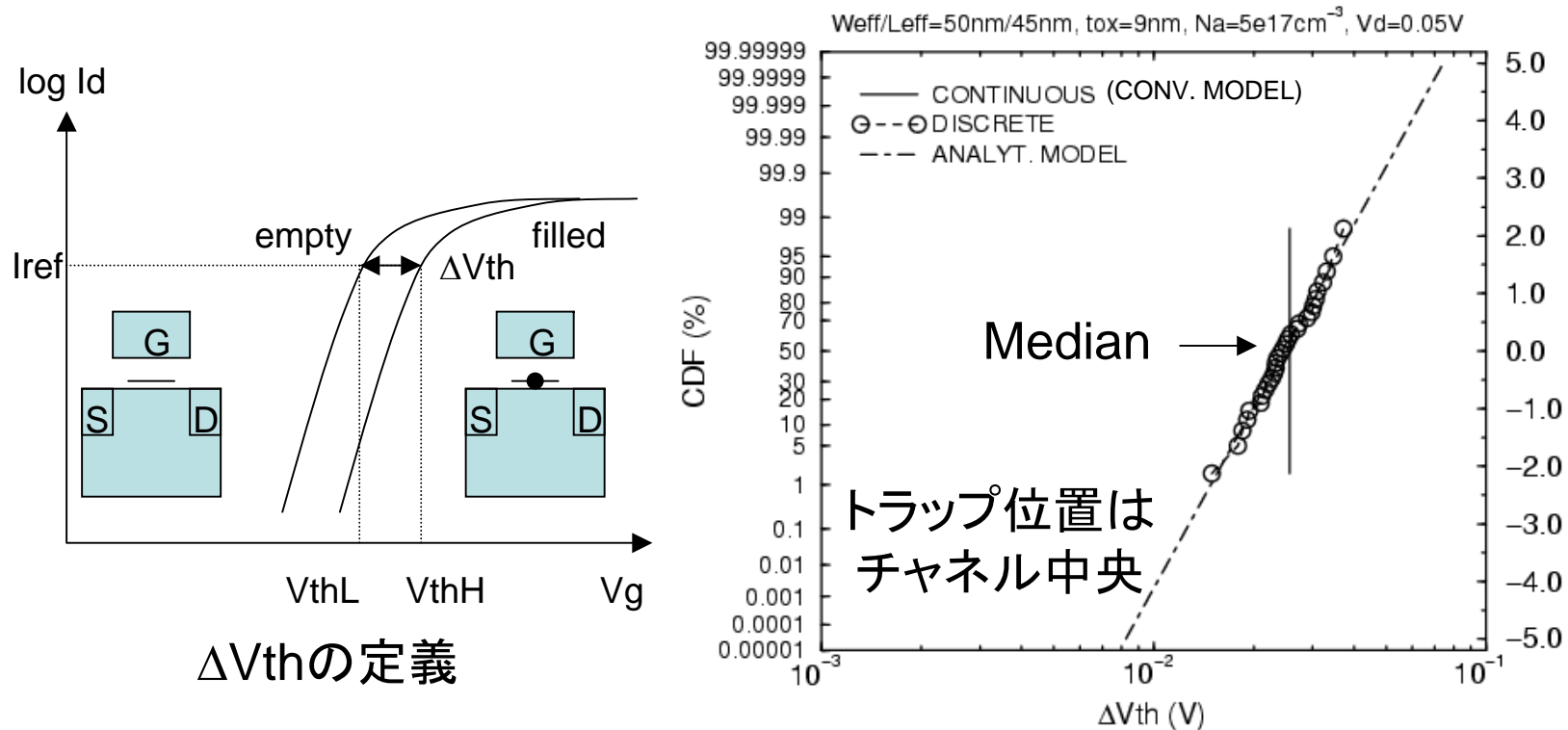
シミュレーション結果

Vth のばらつき



- Vth のばらつきは正規分布に従う。
- 標準偏差は空乏層内の不純物数ばらつきで説明できる。

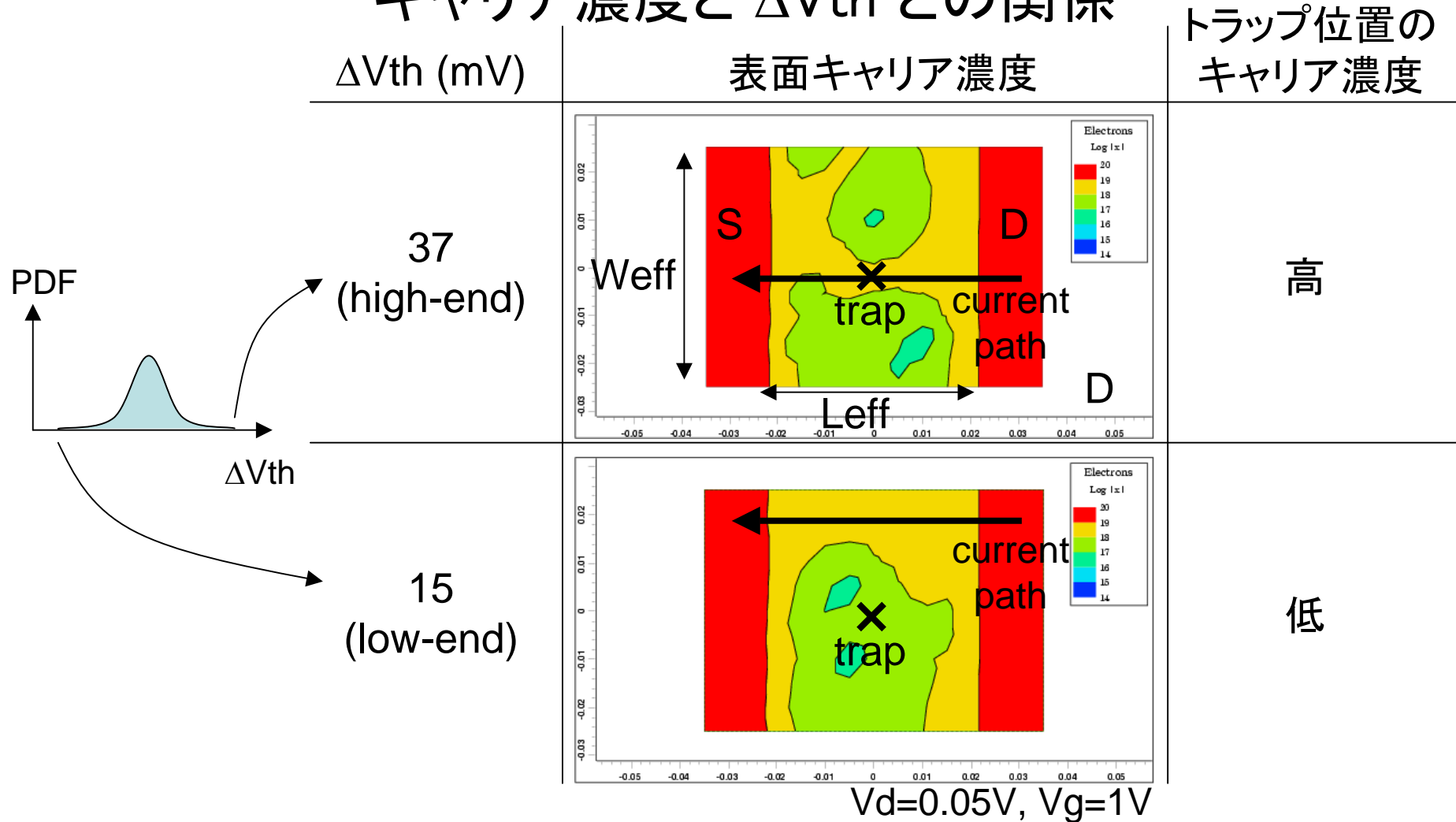
シミュレーション結果 ΔVth のばらつき



- ΔVthのばらつきは予想通り対数正規分布に従う.
- メジアンは従来モデル $q/(Cox*Weff*Leff)$ の値と一致する.

シミュレーション結果

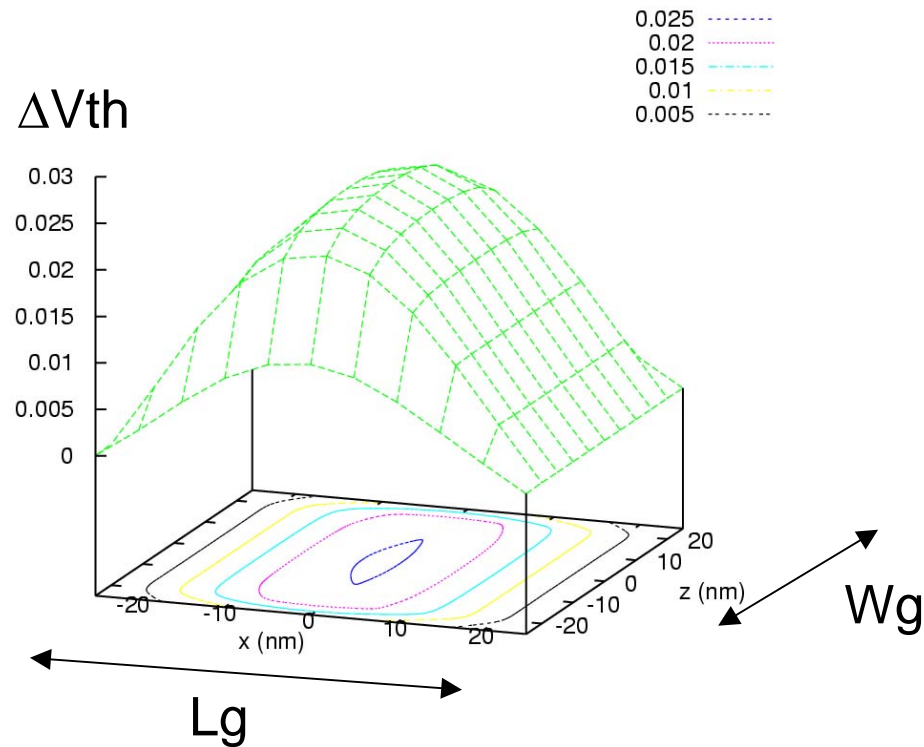
キャリア濃度と ΔV_{th} との関係



トラップ位置のキャリア濃度が高いと ΔV_{th} が大きい。

ΔV_{th} のトラップ位置依存性

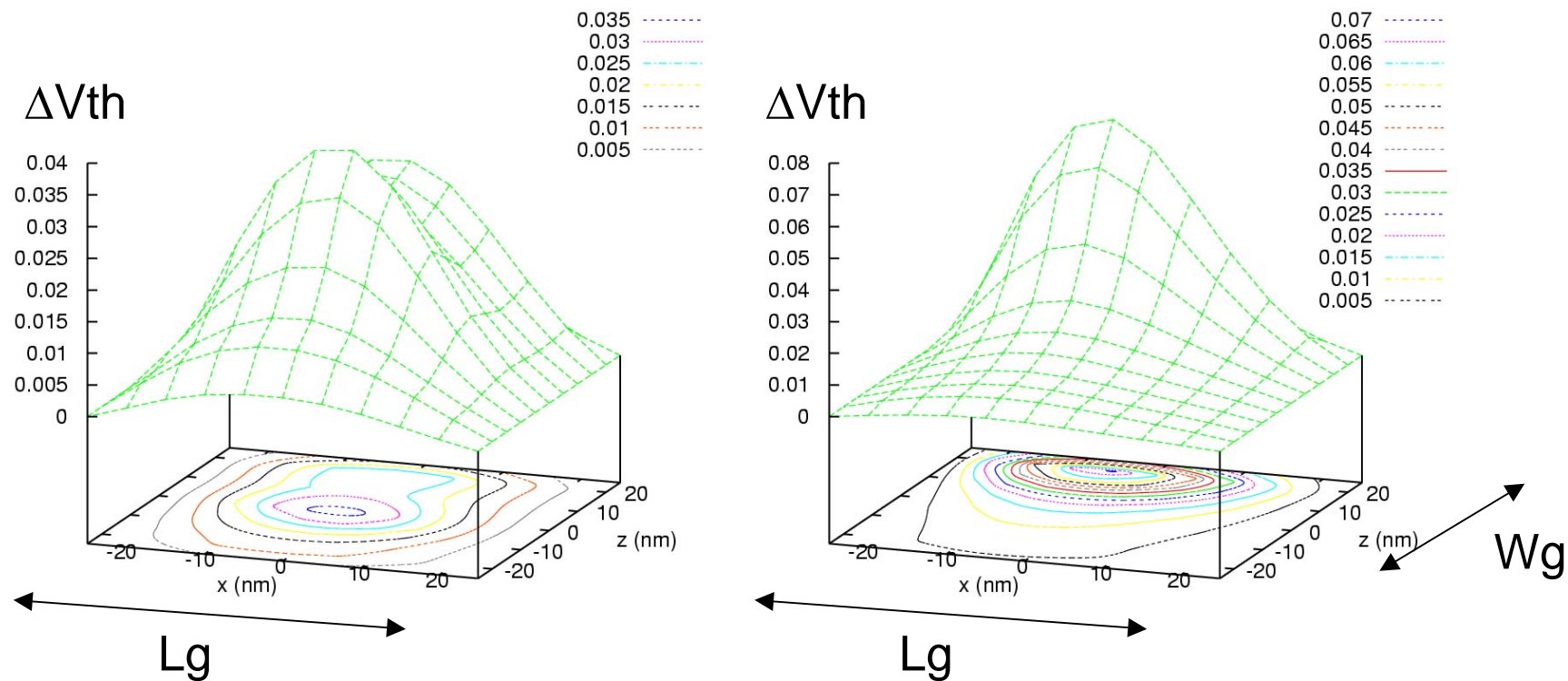
連続不純物分布の場合



連続不純物分布の場合, トラップの位置が
チャンネル中央の場合に ΔV_{th} 最大

ΔV_{th} のトラップ位置依存性

離散不純物分布の場合

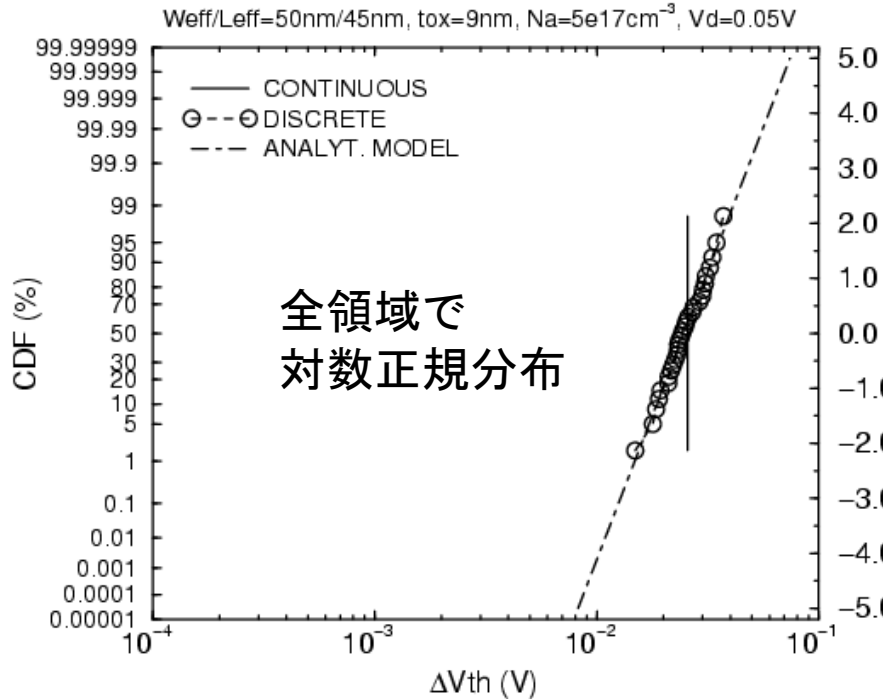


離散不純物分布の場合， ΔV_{th} 最大となるトラップ
の位置がチャネル中央であるとは限らない

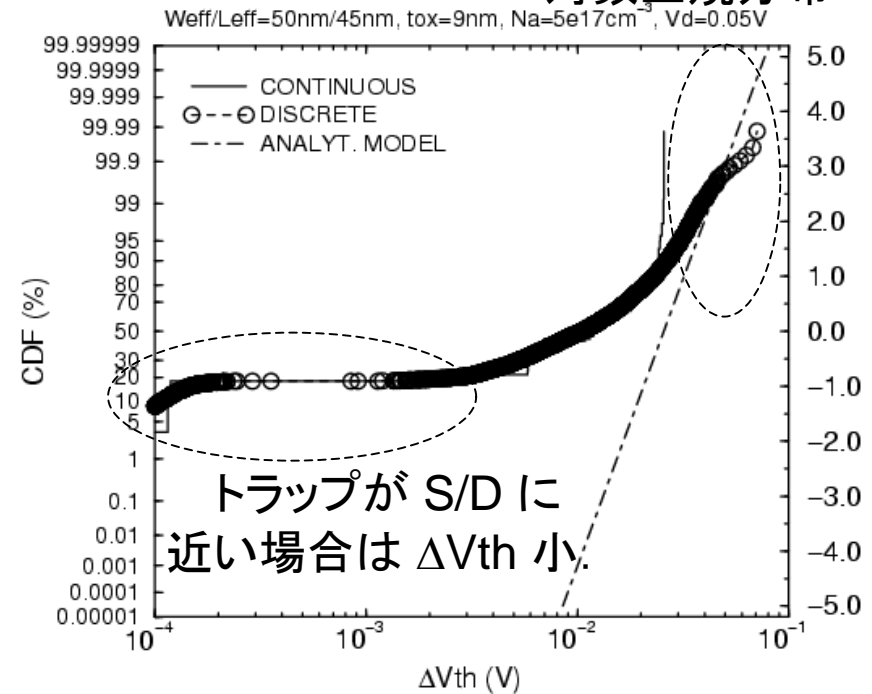
ΔV_{th} のトラップ位置依存性

累積確率密度

分布の上端は
対数正規分布



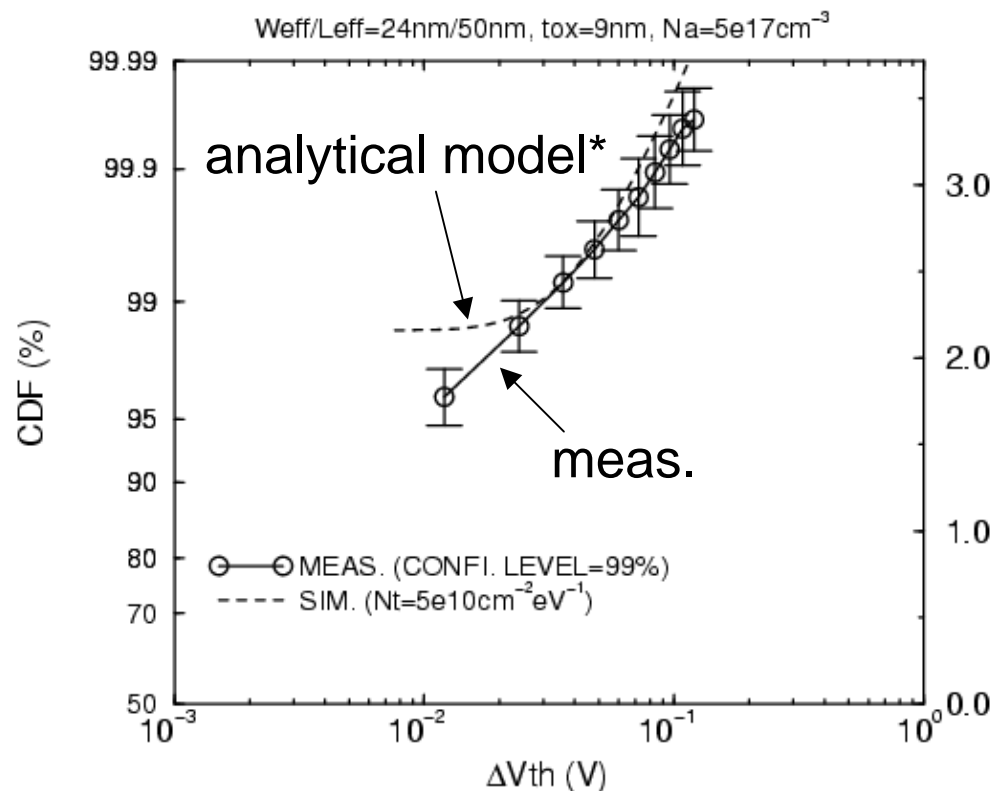
チャンネル中央に固定



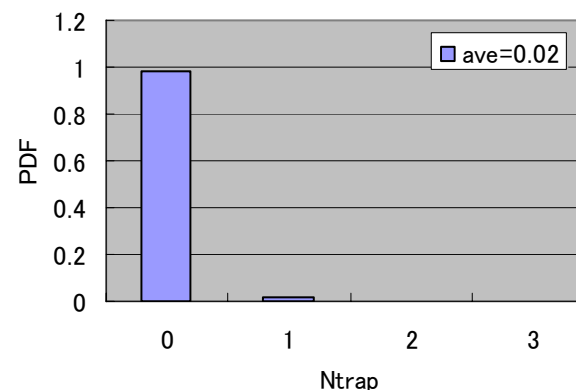
チャンネル内でランダム

トラップ位置がランダムでも
分布の上端は対数正規分布に従う.

測定値との比較



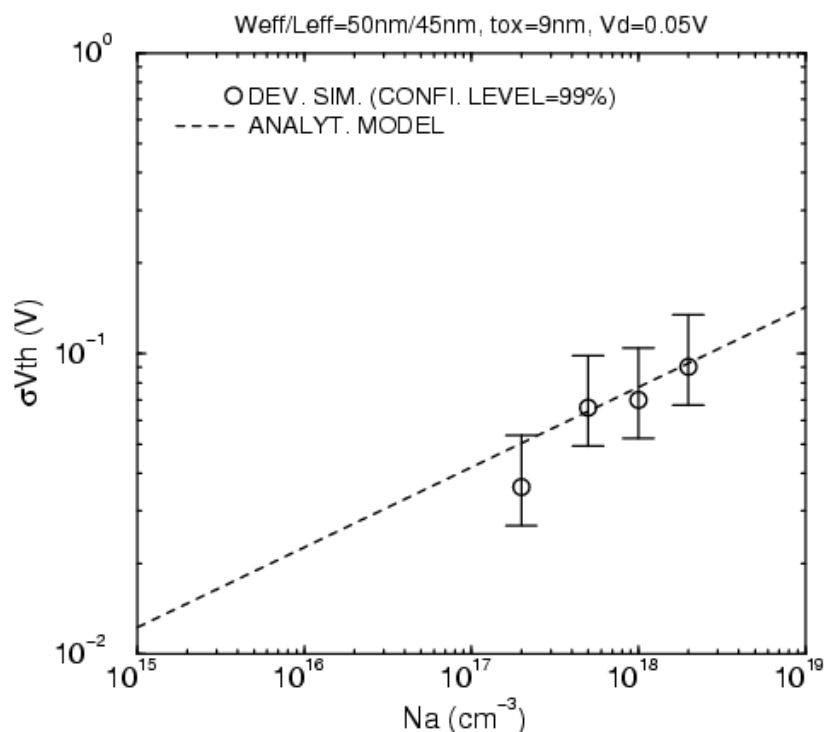
チャンネル内のトラップ数は平均 0.02(=Nt(k*t/q)*Weff*Leff) の Poisson分布に従うと仮定.



大多数 (98%) の
トランジスタは
トラップ数0

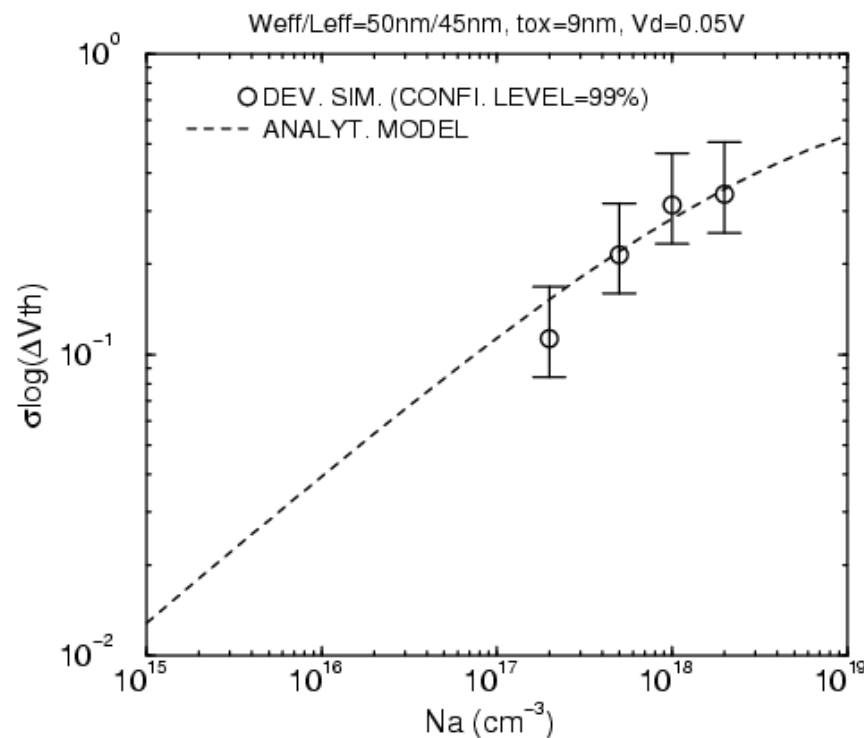
- 測定値は対数正規分布に従う.
- 解析式モデルは測定結果に近い値を示す.

基板不純物濃度依存性



$$\sigma(V_{th}) \sim Na^{1/4}$$

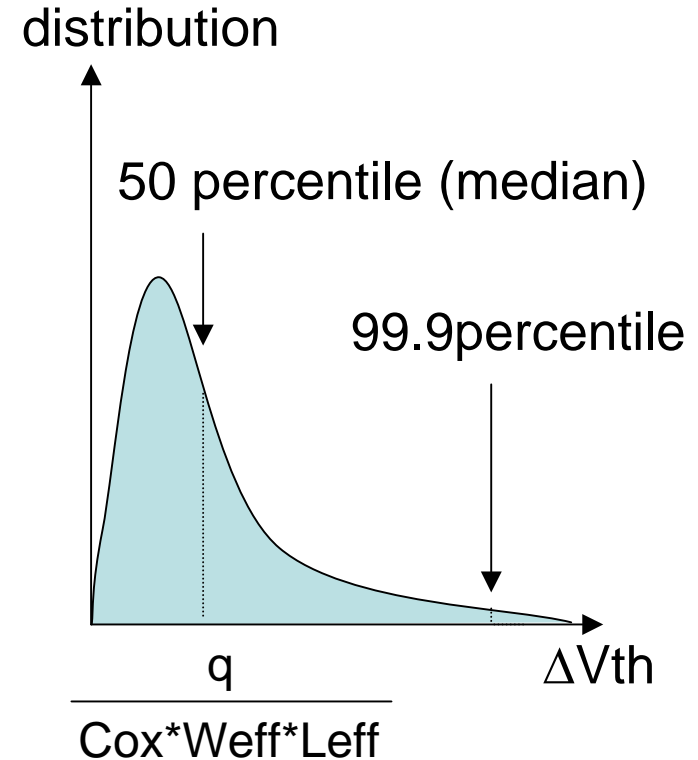
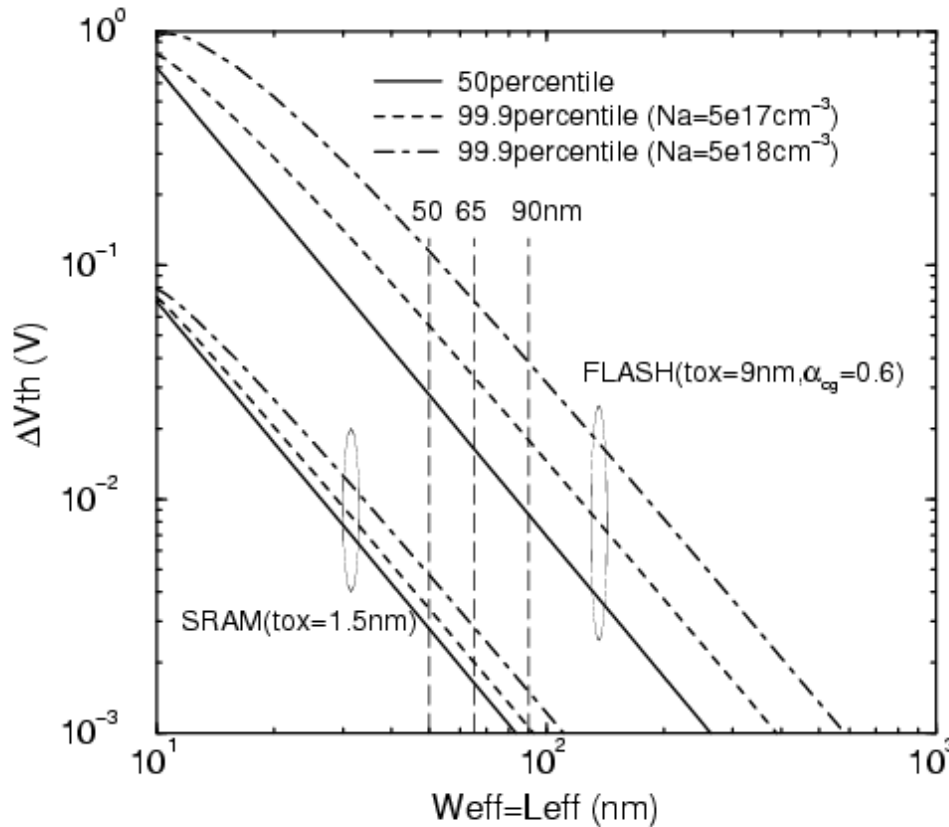
(Mizuno *et al.* ED 1994)



$$\sigma(\log(\Delta V_{th})) \sim Na^{1/2}$$

$\sigma(V_{th})$, $\sigma(\log(\Delta V_{th}))$ とも Na が増えると増加.

スケーリングに与える影響



RTS は 50nm ノード以降のフラッシュメモリの動作に深刻な影響を与える。

4. まとめ

- 離散不純物効果によって, RTS による V_{th} シフト量 ΔV_{th} が統計的にばらつく.
- ΔV_{th} のばらつきは対数正規分布に従う.
- RTS は 50nm ノード以降のフラッシュメモリの動作に深刻な影響を与える可能性がある.



Renesas Technology Corp.