

BSIM4による90nm n-channel MOSFETの Hot Electronの劣化特性モデル化に関する研究

○戸塚拓也

安部文隆 KhatamiRamin 新井 薫子 轟俊一郎
香積 正基 王太峰 青木均 小林 春夫(群馬大学)

群馬大学 工学部 電気電子工学科
情報通信システム第2研究室

Supported by STARC

Outline

- はじめに
- 劣化式の検討
- モデルパラメータ抽出とシミュレーション
- まとめ

Outline

- はじめに
- 劣化式の検討
- モデルパラメータ抽出とシミュレーション
- まとめ

研究背景

アナログ回路設計者

- 集積回路の微細化に伴い、回路仕様に対しての**製造ばらつき**に対応させる必要がある
- **経時劣化**による回路性能の劣化

海外半導体との競争力の低下

研究目的

アナログ回路設計

- ・発振回路の位相ノイズ特性劣化において
MOSFETの $1/f$ ノイズによる影響が大きい



量産のためには経時劣化や製造ばらつきを考慮し
 $1/f$ ノイズ特性を考える必要がある

研究目的

アナログ回路設計

- ・発振回路の位相ノイズ特性劣化において
MOSFETの $1/f$ ノイズによる影響が大きい



量産のためには経時劣化や製造ばらつきを考慮し
 $1/f$ ノイズ特性を考える必要がある

本研究では経時劣化に着目し

nチャネルMOSFETの $1/f$ ノイズの
シミュレーションモデル開発

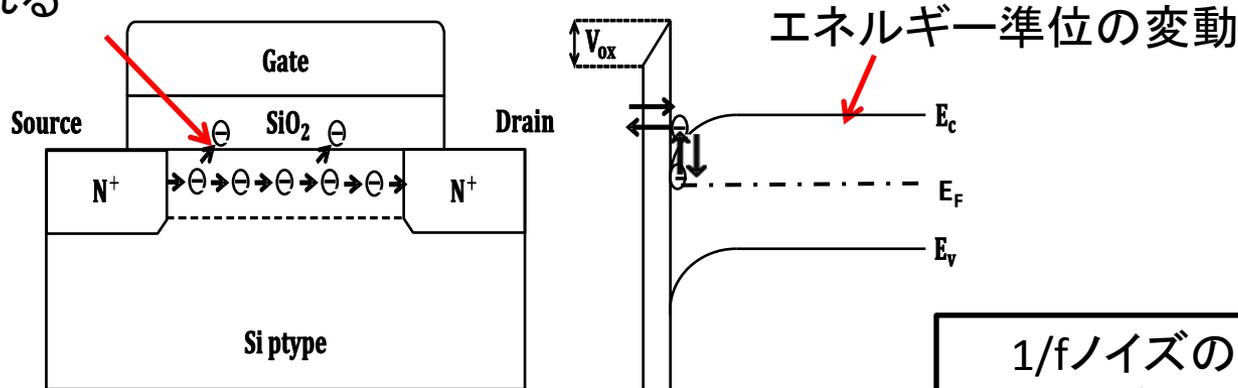
1/fノイズ発生原理

1/fノイズ: トランジスタなど全ての能動素子で発生
低周波数帯で支配的



エネルギー準位の変動によって
トラップされる電子の数の変動が要因

チャンネル中の電子が
トラップされる



エネルギー準位による電子トラップ

1/fノイズの経時, 温度劣化を
モデル化するには I_{ds} の
モデル化が必要

Outline

- はじめに
- 劣化式の検討
- モデルパラメータ抽出とシミュレーション
- まとめ

N-MOSFETの劣化現象

- HCI現象

(Hot Carrier Injection)

高電界領域で電界加速により

チャネルが大きなエネルギーを得ることで

移動度劣化、しきい値電圧の上昇が起こる現象

- PBTI現象

(Positive Bias Temperature Instability)

正の電圧ストレスを長時間かけて

しきい値電圧が上昇する現象

N-MOSFETの劣化現象

- HCI現象

(Hot Carrier Injection)

高電界領域で電界加速により

チャネルが大きなエネルギーを得ることで

移動度劣化、しきい値電圧の上昇が起こる現象

より支配的であるHCI現象に着目し
特性解析を行う。

- PBTI現象

(Positive Bias Temperature Instability)

正の電圧ストレスを長時間かけて

しきい値電圧が上昇する現象

N-MOSFETの劣化現象

- HCl現象

(Hot Carrier Injection)

高電界領域で電界加速により
チャンネルが大きなエネルギーを得ることで
移動度劣化、しきい値電圧の上昇が起こる現象

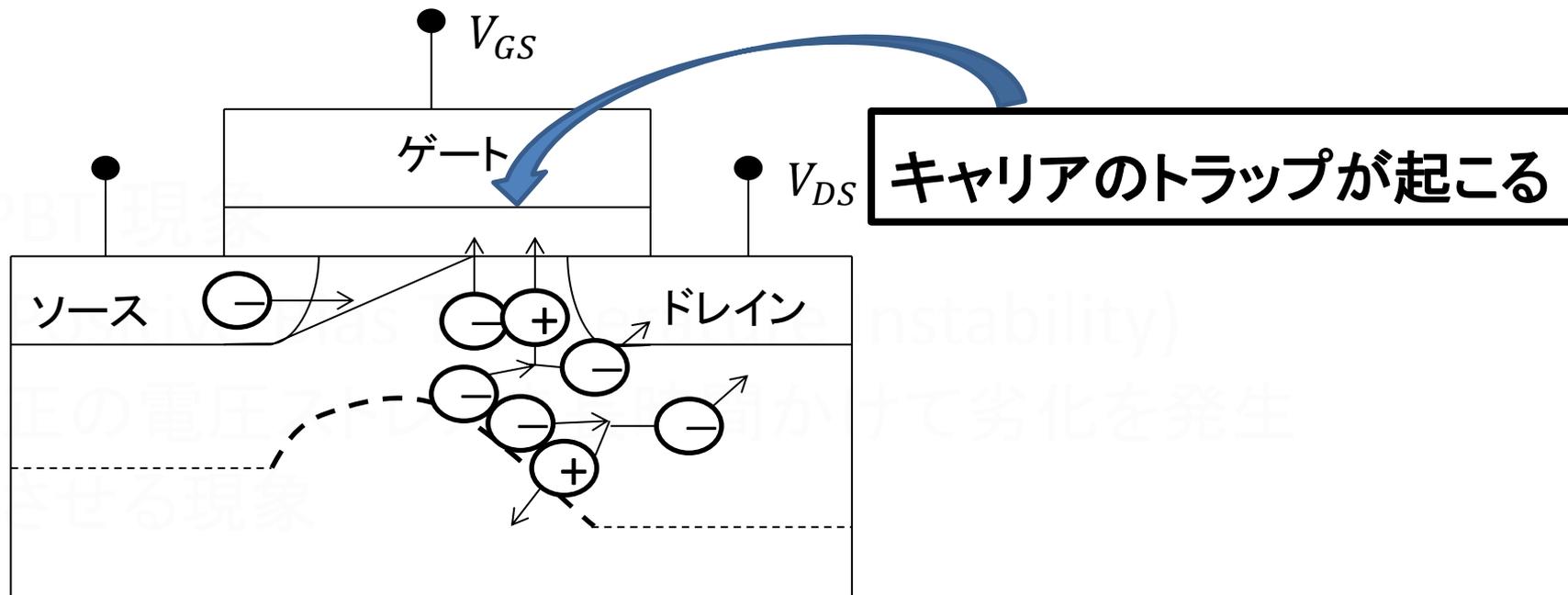


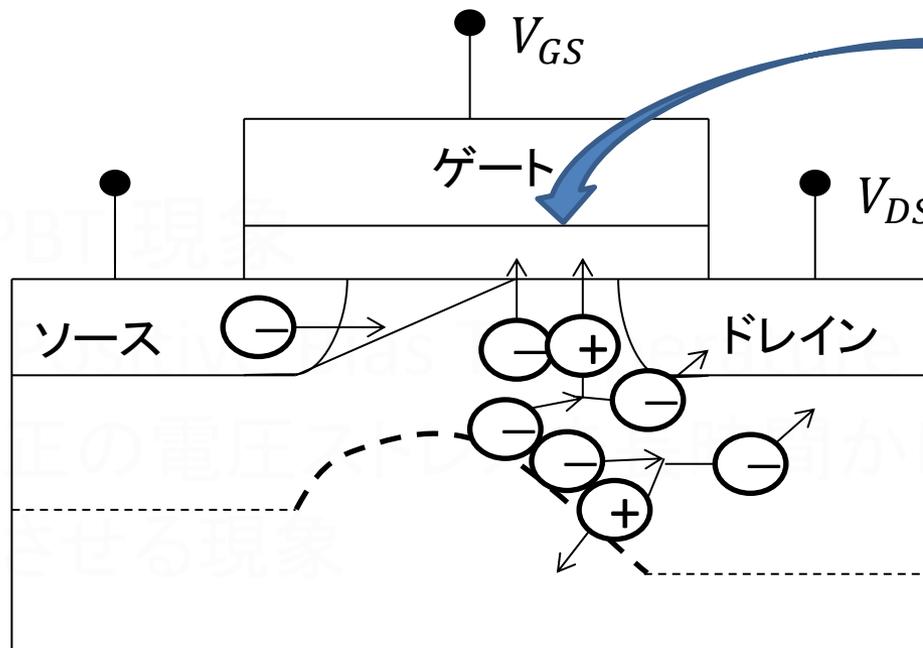
図1:ホットキャリア

N-MOSFETの劣化現象

- HCI現象

(Hot Carrier Injection)

高電界領域で電界加速により
チャンネルが大きなエネルギーを得ることで
移動度劣化、しきい値電圧の上昇が起こる現象



キャリアのトラップが起こる

1/fノイズが増大

図1:ホットキャリア

HCI現象のモデル

- カルフォルニア大学バークレー校のHu教授により導入されたBERTのモデル

- Interface Trap Number を算出
キャリアの移動度についても導出している

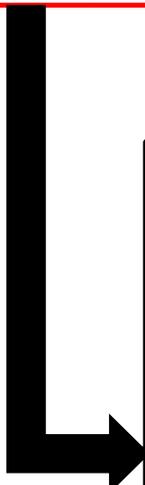
SPICE上でシミュレートするのに適している



劣化前,劣化後のDCパラメータを取り込み
シミュレーションし,劣化DC特性を予想する

使用するモデル

BERTのモデルをBSIM4に使えるように
2004年にKufluogluとAlamによって開発された
RDモデル(Reaction-Diffusion model)を使用する



ドレイン近傍で発生する

ホットキャリア効果のモデル化が可能

水素拡散粒子の生成を方程式で

表しているので劣化を単純化できる

RDモデル

界面トラップ数

$$N_{H(0)} N_{it} \approx \frac{k_F}{k_R} N_0 \quad (1)$$

$N_{H(0)}$	界面における水素濃度の初期値
N_{it}	界面トラップ数
k_F	酸化物電界依存フォワード解離速度定数
k_R	アニーリング速度定数
N_0	Si-H結合の初期値

チャネル/酸化膜界面での水素反応式

$$N_{H_x} = k_H N_H^{n_x} \quad (2)$$

N_H	体積あたりの水素粒子の濃度
k_H	反応定数
n_x	水素粒子あたりの水素原子数

Si-H結合の数より界面トラップ数を算出可能

$$\begin{aligned} N_{it} &= \frac{\pi W}{2A_{tot}} n_x \int_0^{\sqrt{D_{Hxt}}} \left(N_{H_x(0)} \left[r - \frac{r^2}{\sqrt{D_{Hxt}}} \right] \right) dr \\ &= N_{H_x(0)} \frac{\pi n_x}{12L} D_{Hxt} \quad (3) \end{aligned}$$

D_{Hxt}	N_H の密度
A_{tot}	ゲート下の総面積
L	MOSFETの長さ
W	MOSFETの幅

RDモデル

(1),(2),(3)式を組み合わせると(4)式になる

$$N_{it} = \left(\frac{k_F N_0}{k_R} \right)^{\frac{n_x}{1+n_x}} \left(\frac{n_x \pi k_H}{12L} D_H \right)^{\frac{1}{1+n_x}} * t^{\frac{1}{1+n_x}} \quad (4)$$

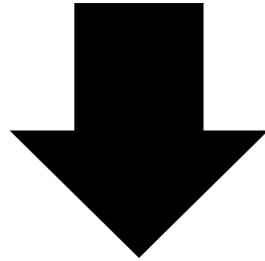
界面トラップによる電荷の電圧依存特性は
しきい値特性カーブのずれで表す

$$\Delta V_{th_{DEGRADATION}} = C_{HCl} \left(\frac{k_F N_0}{k_R} \right)^{\frac{n_x}{1+n_x}} \left(\frac{n_x \pi k_H}{12L} D_H \right)^{\frac{1}{1+n_x}} * t^{\frac{1}{1+n_x}} \quad (5)$$

D_H	水素原子の密度
t	時間
C_{HCl}	技術依存なパラメータ

開発したモデル

しきい値電圧のHCIによる
ずれを移動度モデル式に代入



移動度劣化現象のモデル化

移動度モデル

MOBMOD=1

$$\mu_{eff} = \frac{U0 * f(L_{eff})}{1 + (UA + UC * V_{bseff}) \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right) + UB \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right)^2 + UD \left(\frac{V_{th} * TOXE}{V_{gsteff} + 2V_{th}} \right)^2} \quad (6)$$

MOBMOD=2

$$\mu_{eff} = \frac{U0}{1 + (UA + UC * V_{bseff}) \left[\frac{V_{gsteff} + C_0 (V_{TH0} - V_{FB} - \phi_s)}{TOXE} \right]^{EU}} \quad (7)$$

MOBMOD=3

$$\mu_{eff} = \frac{U0 * f(L_{eff})}{1 + UD \left(\frac{V_{th} * TOXE}{V_{gsteff} + 2V_{th}} \right)^2 + (1 + UC * V_{bseff}) \left[UA \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right) + UB \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$f(L_{eff})$ は以下のように示す

$$f(L_{eff}) = 1 - UP * \exp \left(- \frac{L_{eff}}{LP} \right) \quad (9)$$

移動度モデル

MOBMOD=1

$$\mu_{eff} = \frac{U0 * f(L_{eff})}{1 + (UA + UC * V_{bseff}) \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right) + UB \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right)^2 + UD \left(\frac{V_{th} * TOXE}{V_{gsteff} + 2V_{th}} \right)^2} \quad (6)$$

MOBMOD=2

$$\mu_{eff} = \frac{U0}{1 + (UA + UC * V_{bseff}) \left[\frac{V_{gsteff} + C0(V_{TH0} - V_{FB} - \phi_s)}{TOXE} \right]^{EU}} \quad (7)$$

MOBMOD=3

$$\mu_{eff} = \frac{U0 * f(L_{eff})}{1 + UD \left(\frac{V_{th} * TOXE}{V_{gsteff} + 2V_{th}} \right)^2 + (1 + UC * V_{bseff}) \left[UA \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right) + UB \left(\frac{V_{gsteff} + 2V_{th}}{TOXE} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$f(L_{eff})$ は以下のように示す

$$f(L_{eff}) = 1 - UP * \exp\left(-\frac{L_{eff}}{LP}\right) \quad (9)$$

移動度モデル

しきい値パラメータを使用しているのは(1-7)式のみ



MOBMOD=2でモデルパラメータの抽出,最適化
劣化のシミュレートを行う

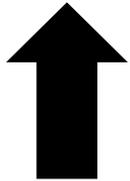
$$\mu_{\text{eff}} = \frac{U_0}{1 + (UA + UC * V_{bseff}) \left[\frac{V_{gsteff} + C_0 (V_{TH0} - V_{FB} - \phi_s)}{TOXE} \right]^{EU}} \quad (7)$$

U0	キャリア移動度	VFB	フラットバンド電圧
UA	移動度劣化の一次係数	V_{gsteff}	$V_{gs} - V_{th}$ の実効値
UC	移動度劣化の基板効果係数	V_{bseff}	実効基板・ソース電圧
TOXE	電気ゲート酸化膜厚	ϕ_s	表面電位
VTH0	ドレイン電圧がゼロにおけるしきい値電圧	C_0	定数でnMOSの場合2.0

しきい値劣化のモデル式

BSIM4モデルのしきい値式に(5)式を加え
直接しきい値が可変できる

$$\begin{aligned} V_{th} = & V_{TH0} + \Delta V_{th, body_effect} - \Delta V_{th, charge_sharing} - \Delta V_{th, DIBL} \\ & + \Delta V_{th, reverse_short_cannel} + \Delta V_{th, narrowwidth} \\ & + \Delta V_{th, small_size} - \Delta V_{th, pocket_implant} \\ & + \Delta V_{th_DEGRADATION} \end{aligned} \quad (10)$$



$$\Delta V_{th_DEGRADATION} = C_{HCI} \left(\frac{k_F N_0}{k_R} \right)^{\frac{n_x}{1+n_x}} \left(\frac{n_x \pi k_H}{12L} D_H \right)^{\frac{1}{1+n_x}} * t^{\frac{1}{1+n_x}} \quad (5)$$

Outline

- はじめに
- 劣化式の検討
- **モデルパラメータ抽出とシミュレーション**
- まとめ

シミュレーション条件

デバイスが出来上がっていないため
劣化後のシミュレーションは予想である

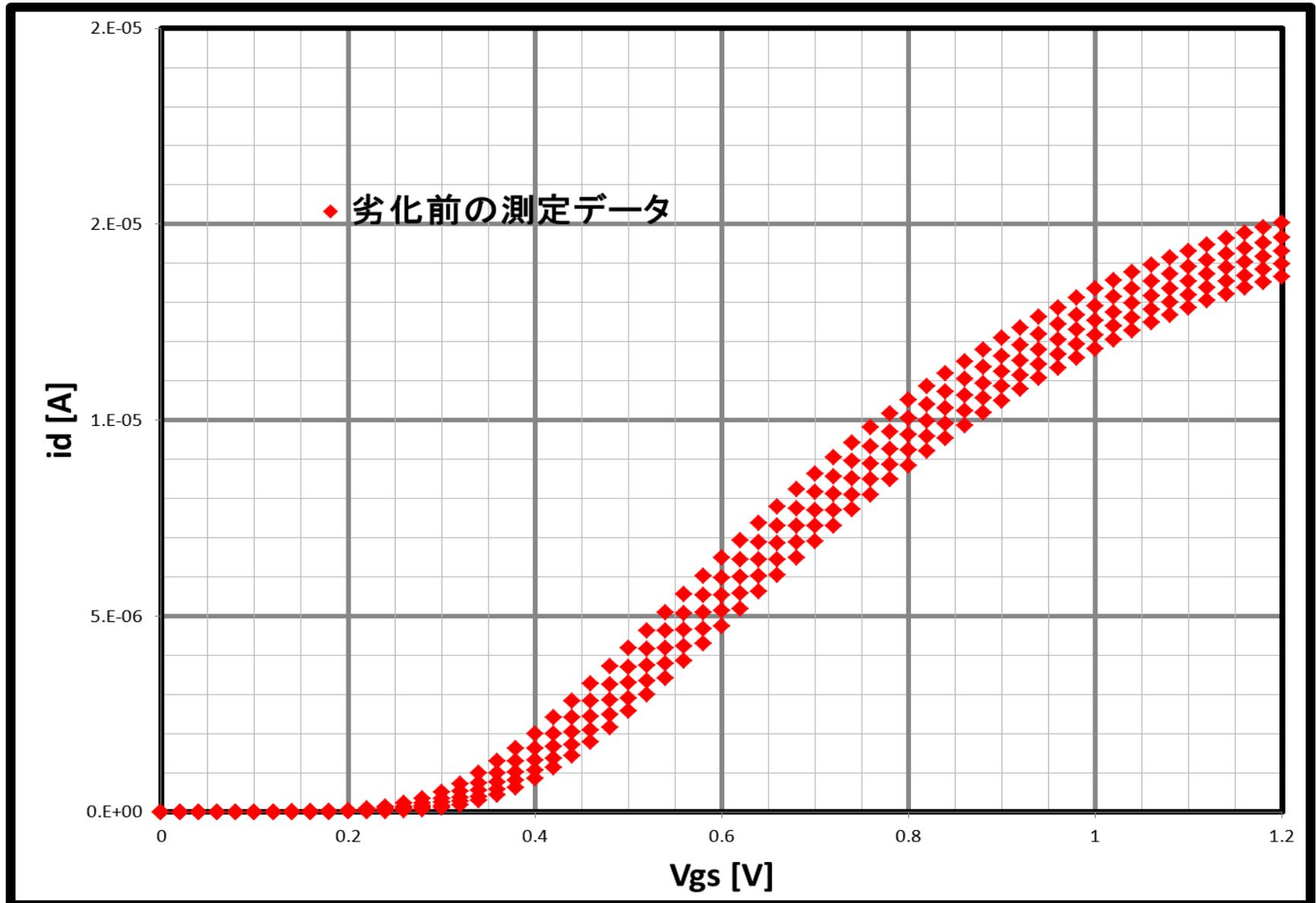
シミュレーションに用いるデバイス

- 95nm nチャネル MOSFET
- チャネル幅 10.0 μm
- チャネル長 10.0 μm

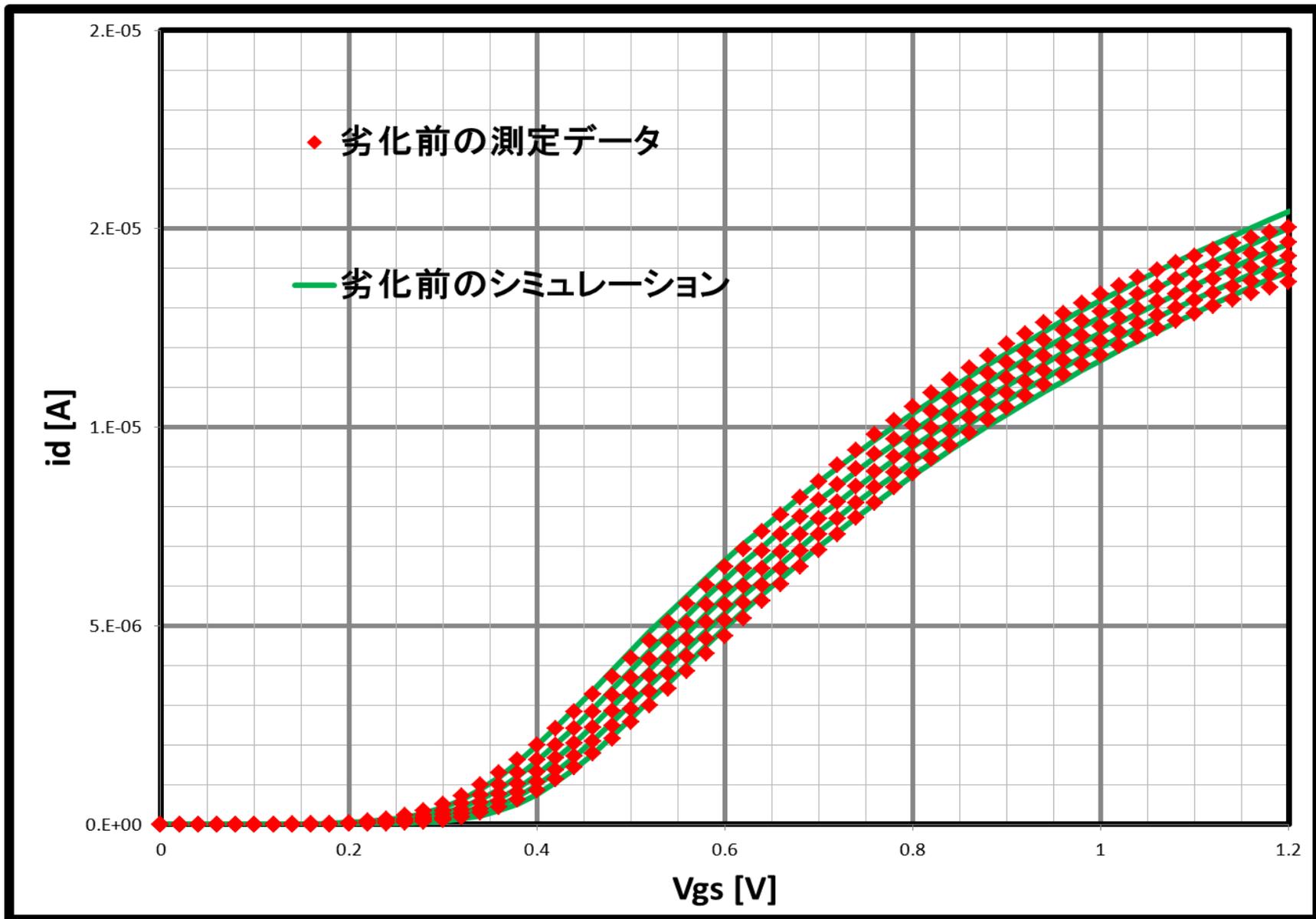
劣化させる環境

- 65nmのデバイスの実験データをもとにパラメータ劣化
- 温度 300.15K
- 劣化時間 1000秒

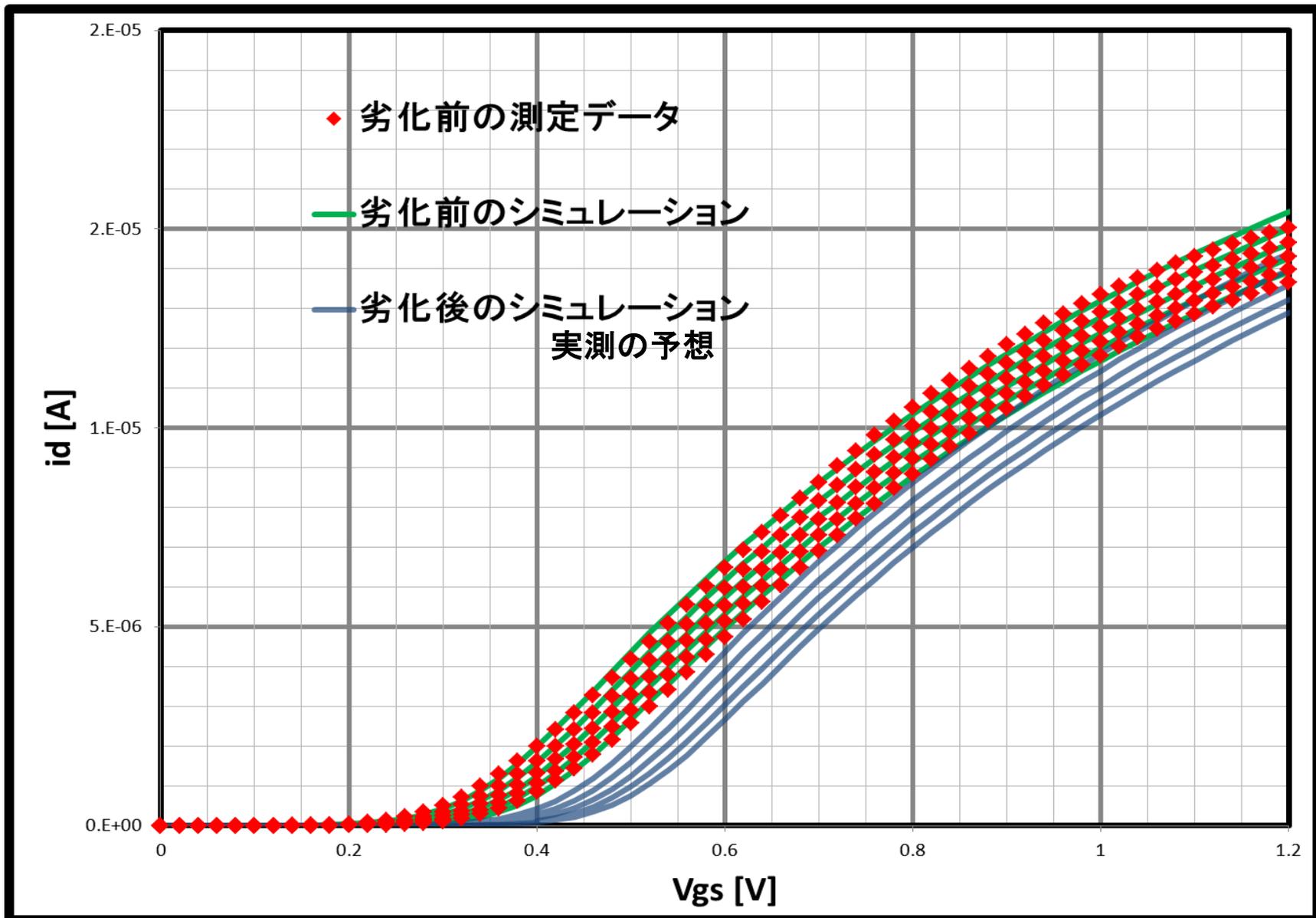
Ids-Vgs特性



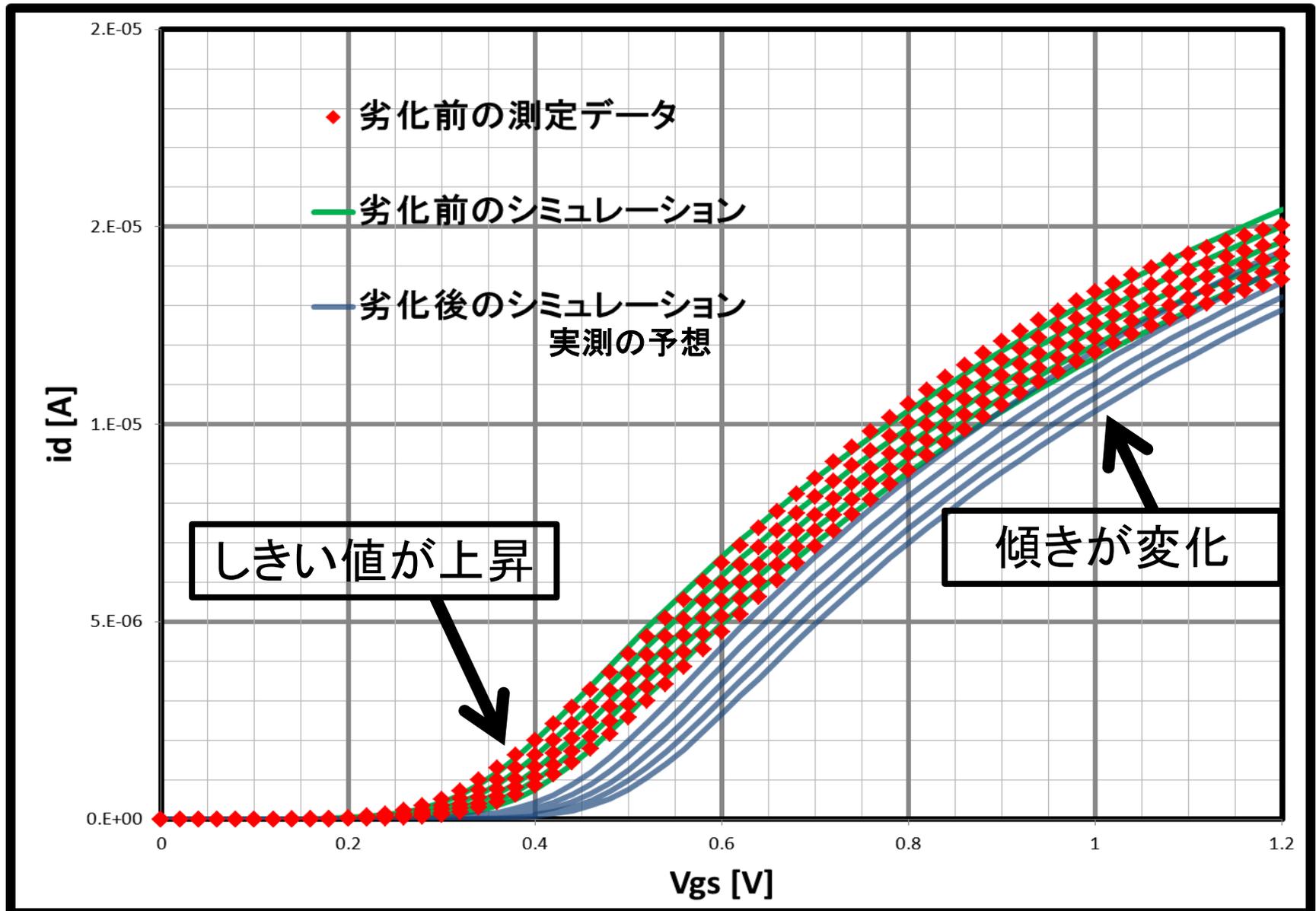
Ids-Vgs特性



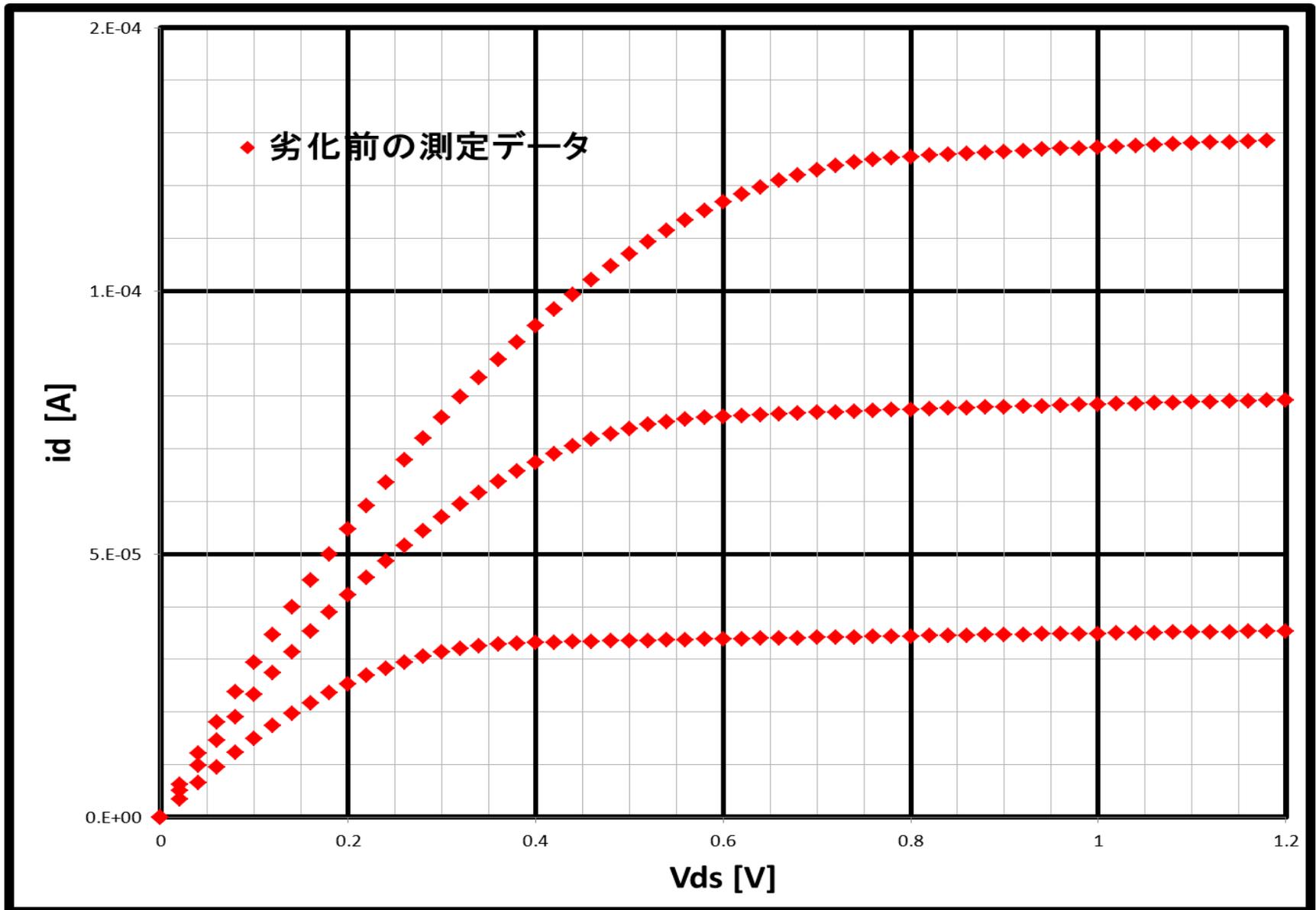
Ids-Vgs特性



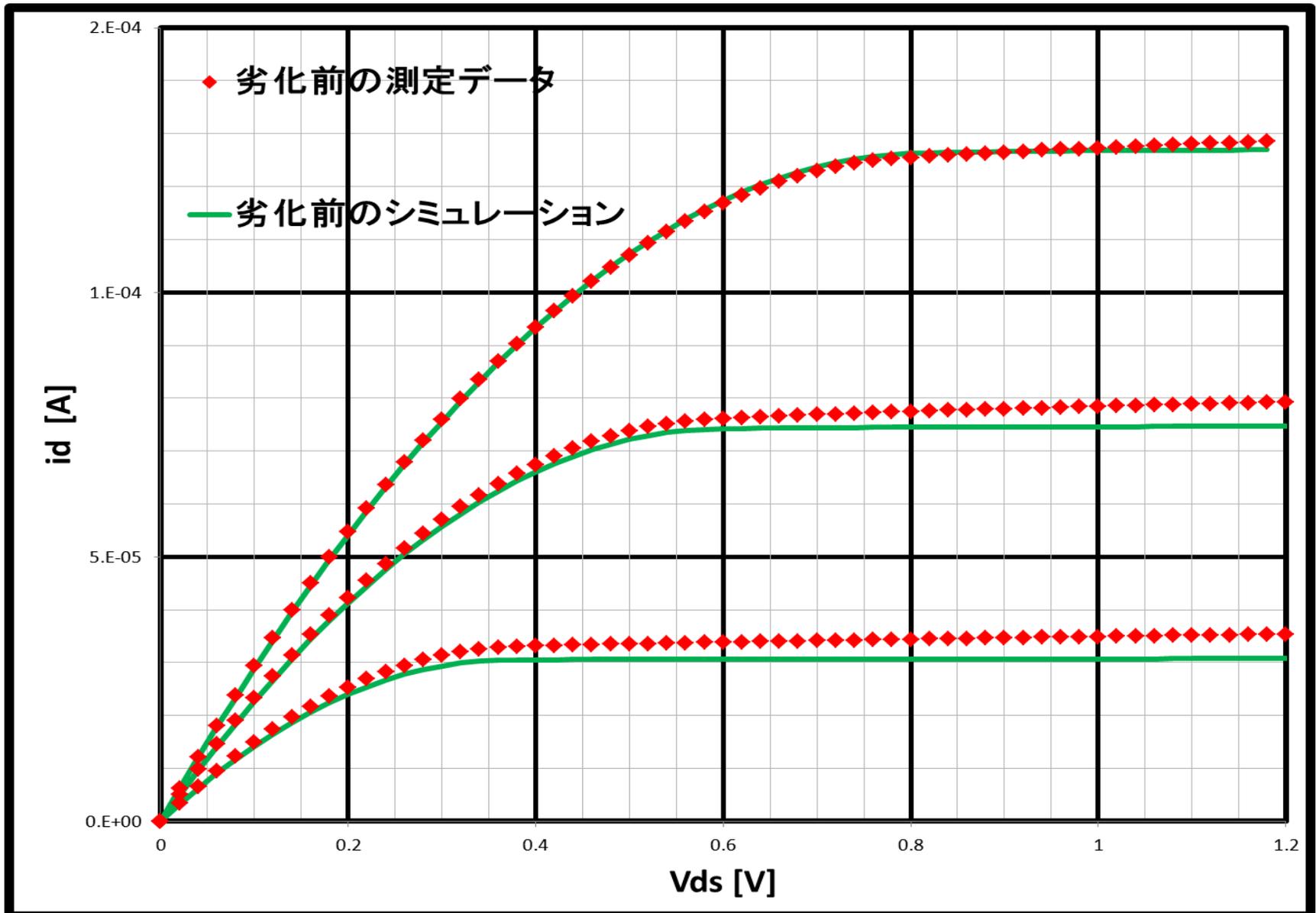
Ids-Vgs特性



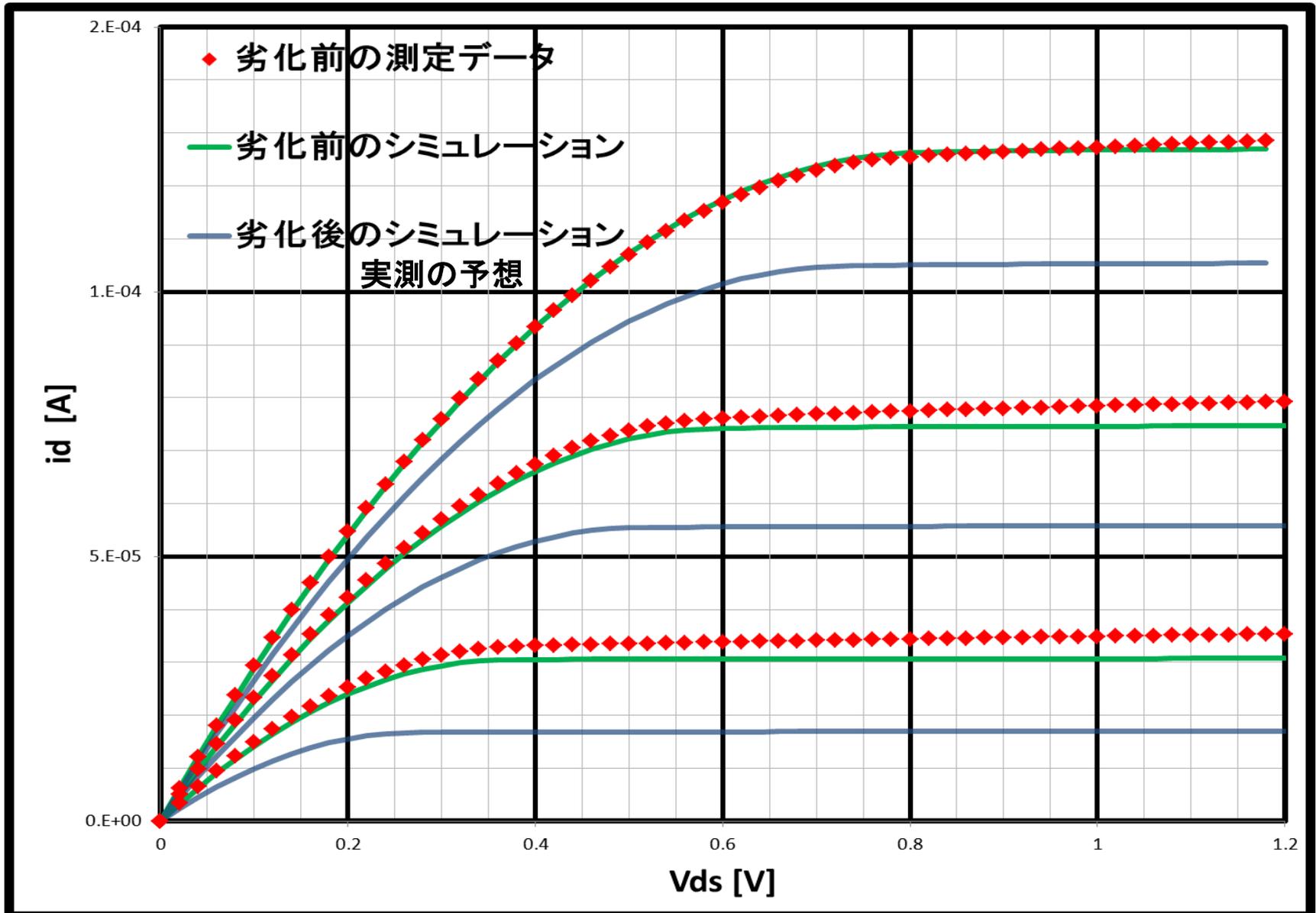
Ids-Vds特性



Ids-Vds特性

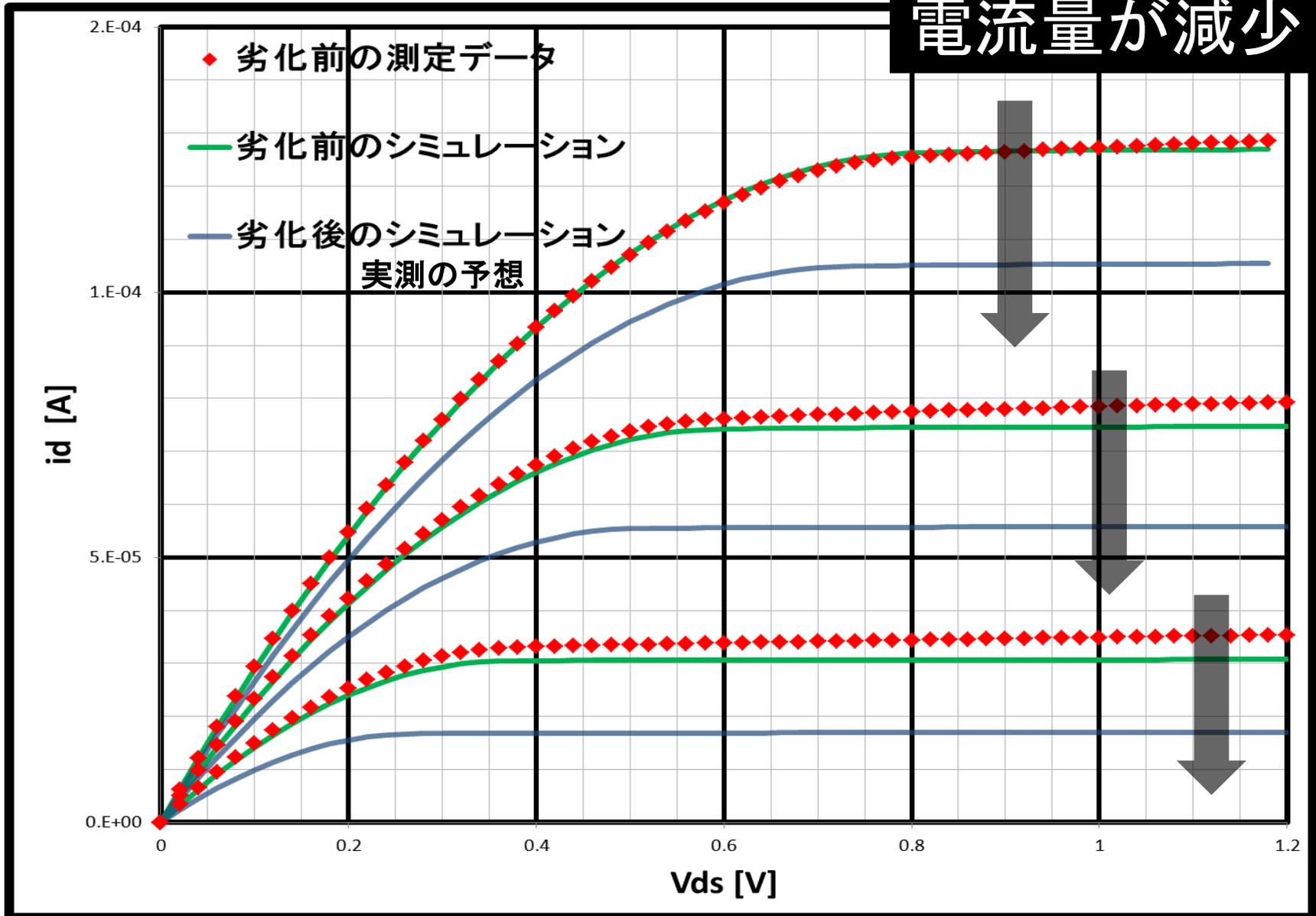


Ids-Vds特性



Ids-Vds特性

電流量が減少



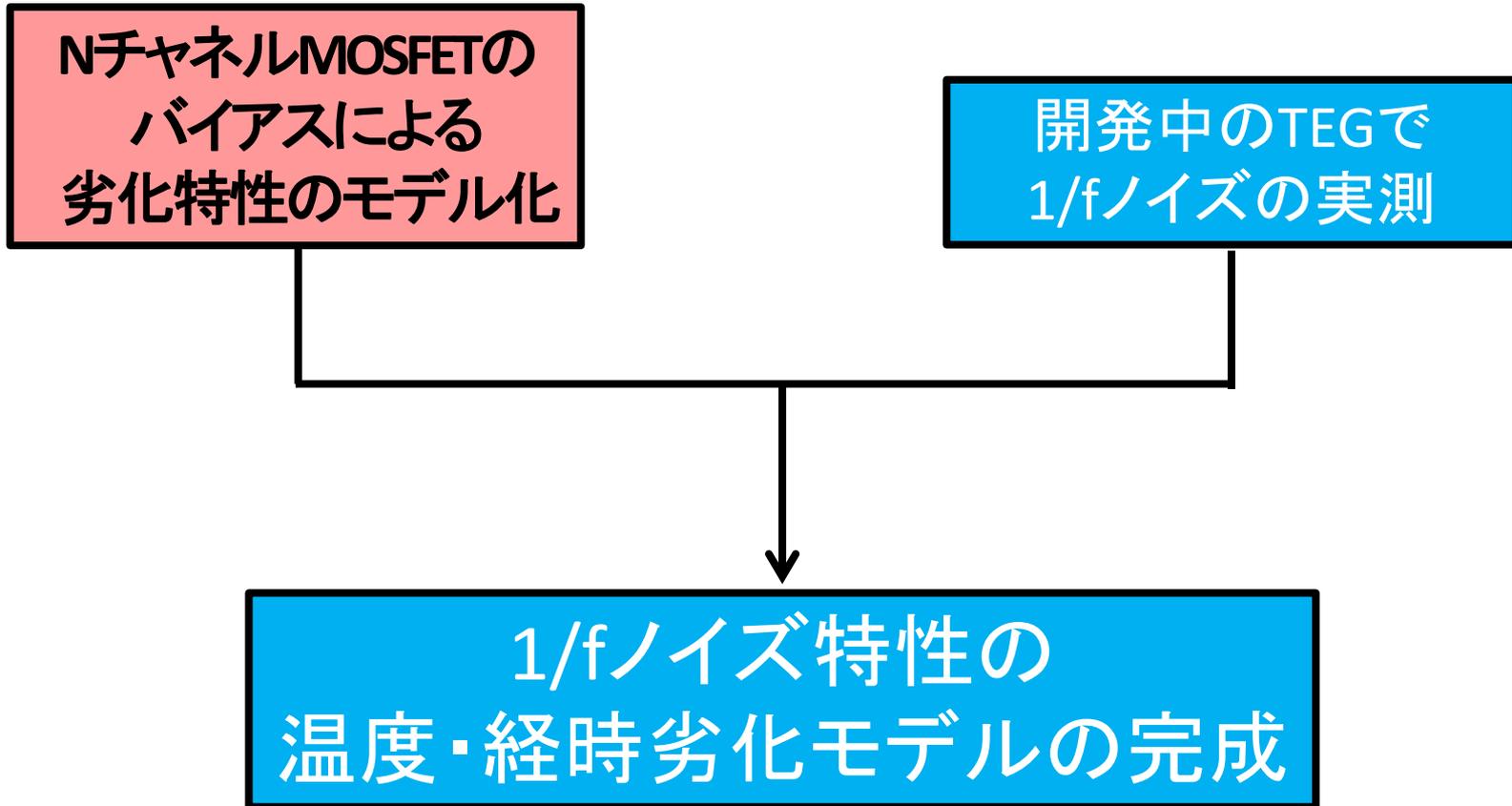
Outline

- はじめに
- 劣化式の検討
- モデルパラメータ抽出とシミュレーション
- まとめ

まとめ

- HCI現象を用いて界面トラップによるしきい値特性カーブのずれをSPICEモデルに代入, 移動度劣化現象をモデル化し、劣化シミュレーションを開発
- パラメータ抽出した後, 劣化前,劣化後の直流電圧・電流特性の予想を行った

今後の課題



赤背景は開発済
青背景が今後開発していく事

Q&A コメント

- しきい値劣化と移動度劣化単体の比較も必要ではないか
- 使用しているデバイスは測定用のものですか？
1 μ m以下のものではどうなるのか？

測定用です。

同じような結果が得られるのではないかと答えました