

# 埋め込みソースフィールドプレートを有する AlN/GaN MIS-HEMTデバイスの小信号 AC特性モデルの開発

澁谷将平 青木均 築地伸和 栗原圭汰

東野将史 高橋莉乃 小林春夫

坂入寛之 黒田尚孝 近松健太郎 中原健

群馬大学 ローム株式会社

- 研究背景、目的
- 埋め込みソースフィールドプレートを有するAlN/GaN MIS-HEMT
- 等価回路によるAC特性モデル
- まとめ

- 研究背景、目的
- 埋め込みソースフィールドプレートを有するAlN/GaN MIS-HEMT
- 等価回路によるAC特性モデル
- まとめ

## パワーデバイスの材料変化

Siデバイス

→ 材料限界に到達

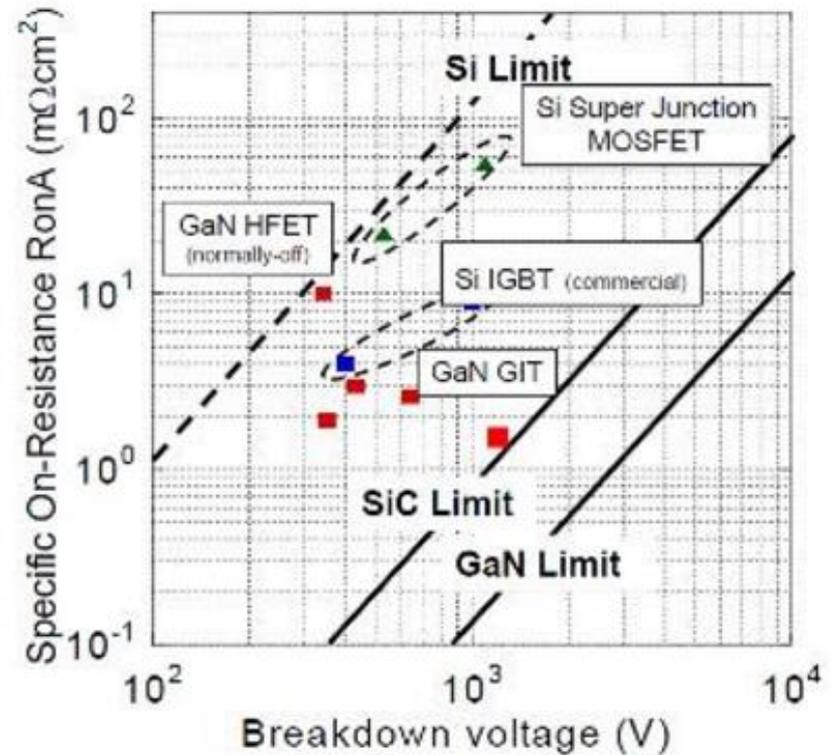


GaN、SiC

といった化合物材料に着目

→ 更なる性能向上

各半導体材料の材料限界  
(ブレークダウン電圧-オン抵抗)



パワー用GaN HEMTの開発、量産が進められている

HEMT : High Electron Mobility Transistor

新規構造をもつAlN/GaN MIS-HEMT

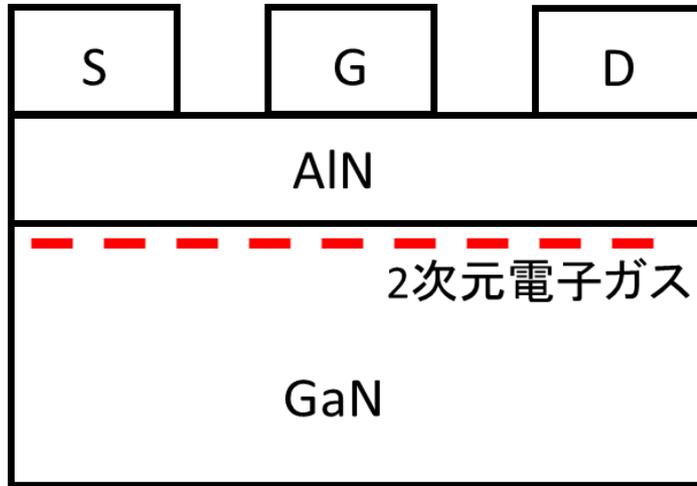


回路シミュレーションのためのデバイスモデル無し



新規構造（MISゲート+ソースフィールドプレート）  
を考慮した新たなデバイスモデルを開発

- 研究背景、目的
- 埋め込みソースフィールドプレートを有するAlN/GaN MIS-HEMT
- 等価回路によるAC特性モデル
- まとめ

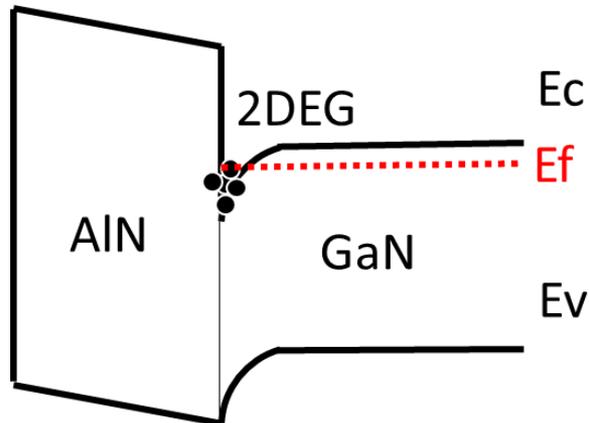


AlNとGaNのヘテロ接合

→ 接合界面に電子が充満  
(2次元電子ガス:2DEG)

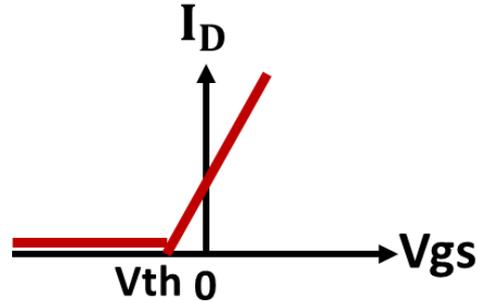
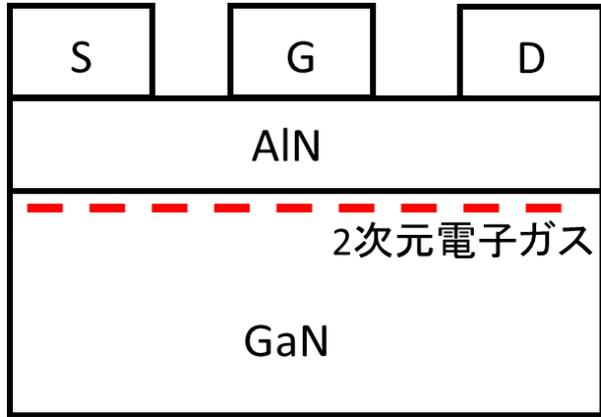
- 高電子移動度
- 低雑音、高利得

接合界面



高速スイッチングによる  
パワーデバイスとしての利用

# MISゲート構造によるノーマリーオフ動作

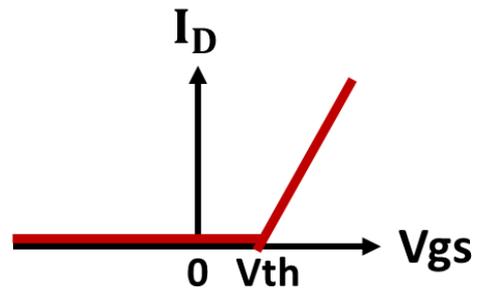
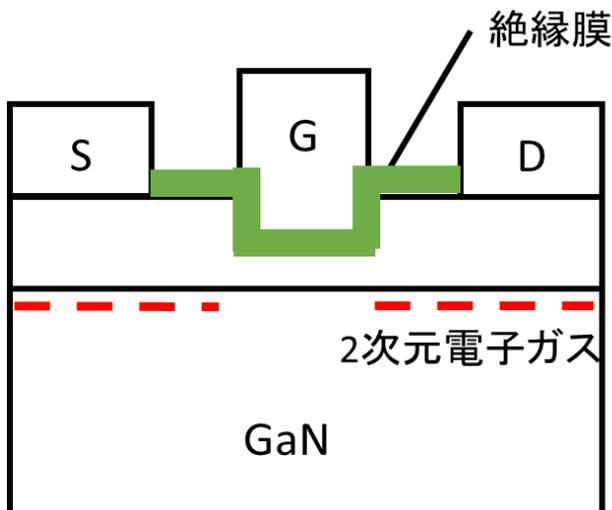


しきい値がマイナス  
⇒バイアスなしで電  
流が流れる

ノーマリーオン動作

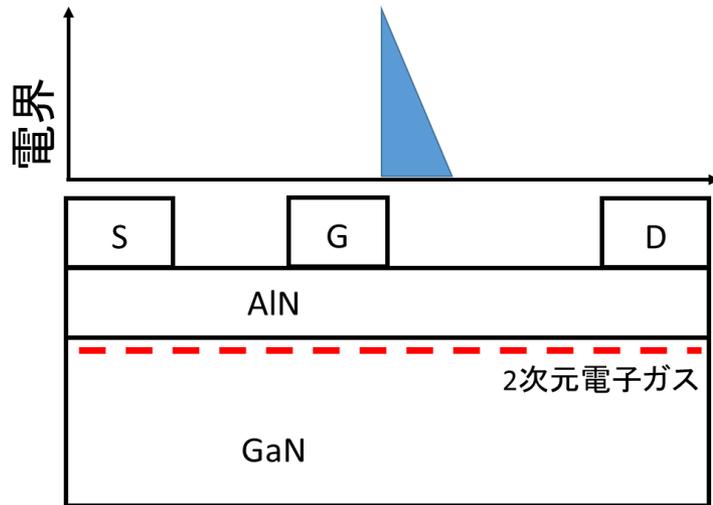


MISゲート構造への変更



しきい値がプラス  
⇒バイアスをかけて  
電流が流れる

ノーマリーオフ動作



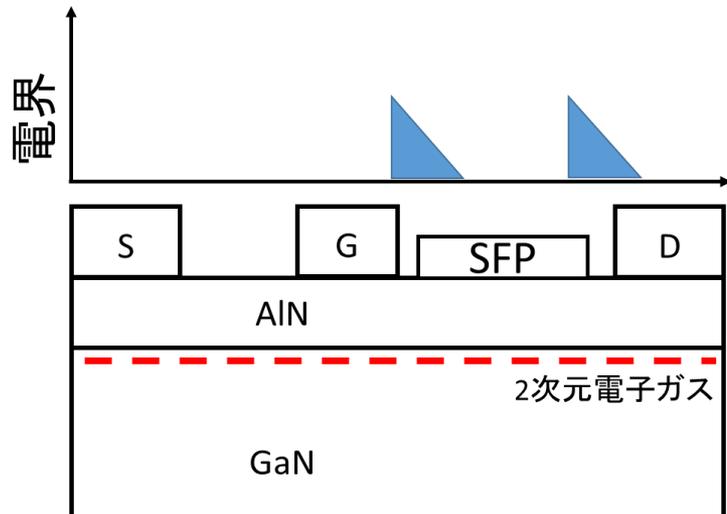
ゲートの端に電界が集中



絶縁膜が破壊



SFPの追加

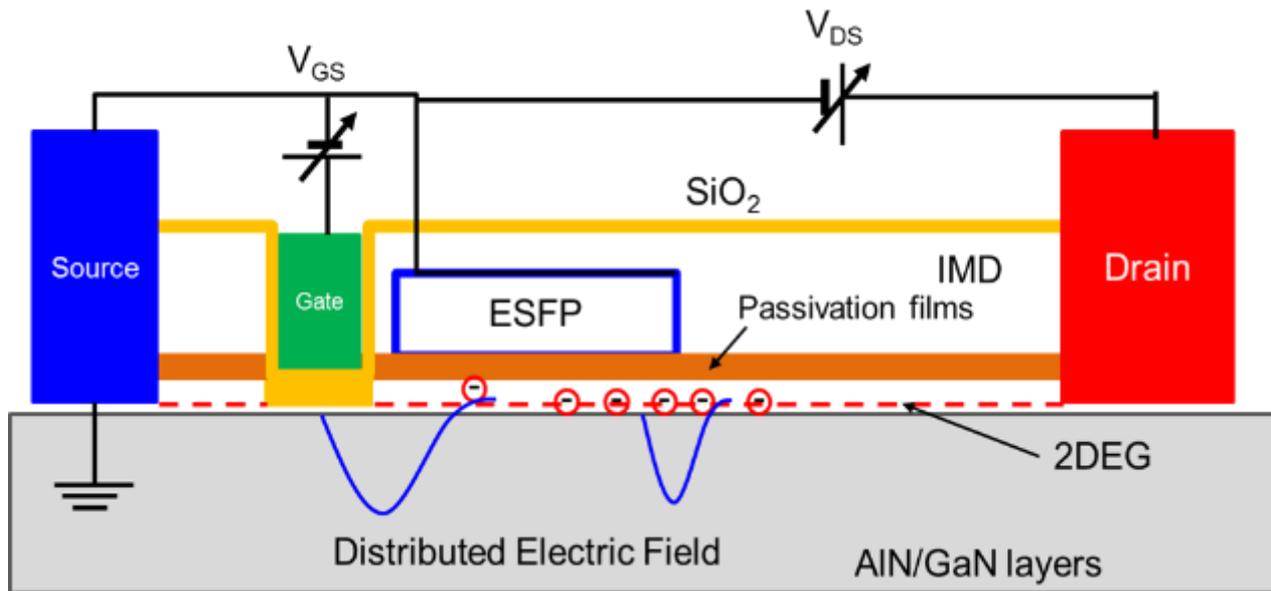


ゲートの端だけでなく  
SFPに電界を分散



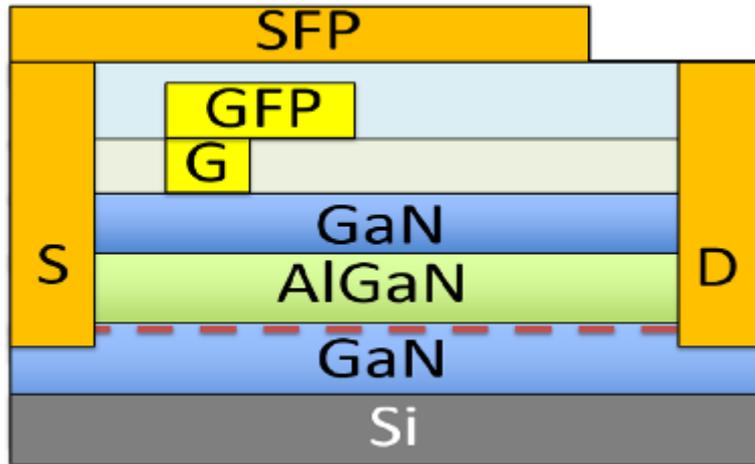
さらに高い電圧に  
耐えられる

## モデル作成の対象となるデバイス構造



- 埋め込みソースフィールドプレート(ESFP)
- Metal-Insulator-Semiconductor(MIS)ゲートの2つの構造を有する

- 研究背景、目的
- 埋め込みソースフィールドプレートを有するAlN/GaN MIS-HEMT
- 等価回路によるAC特性モデル
- まとめ



## GaN HEMTの各構成要素を トランジスタと考えたモデル

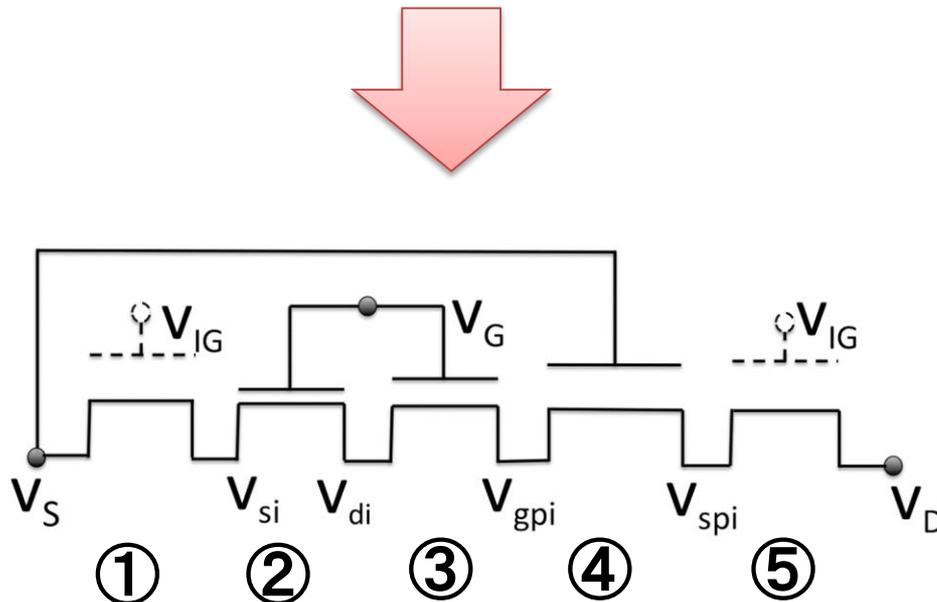
①インプリシットゲートアクセス領域トランジスタ

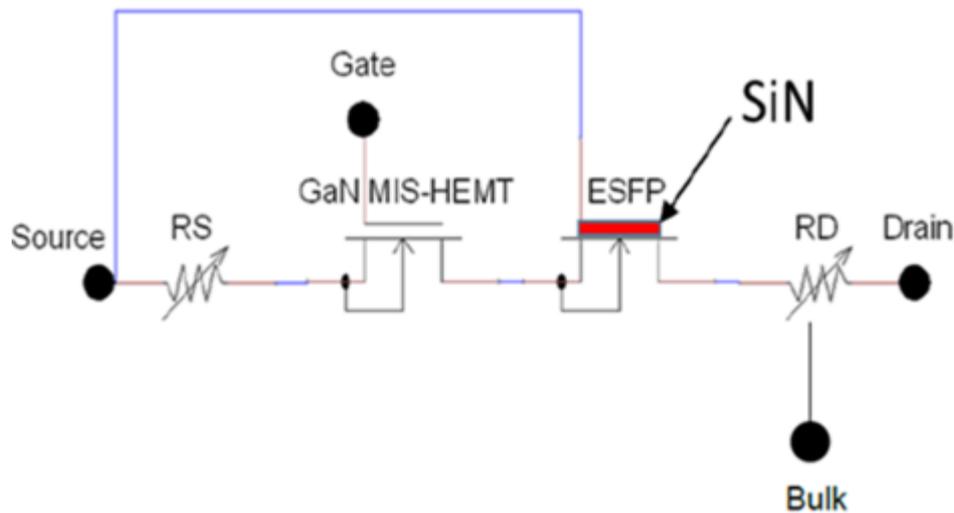
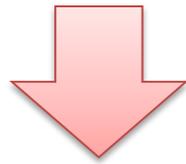
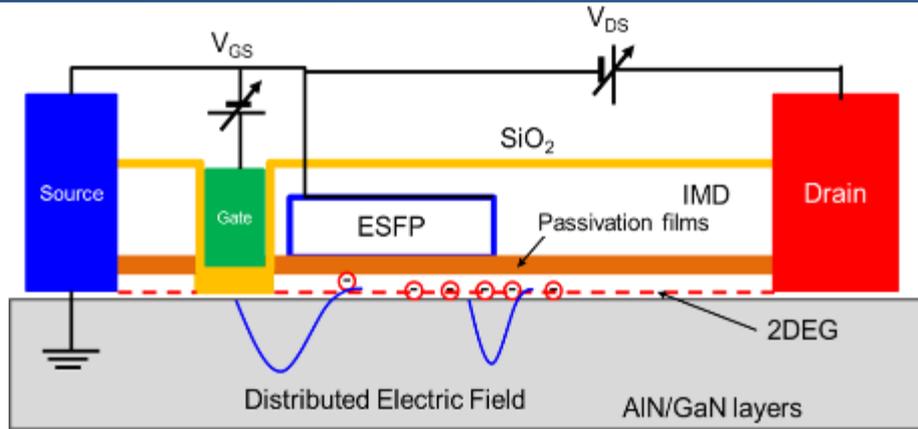
②真性トランジスタ

③ゲートフィールドプレートトランジスタ

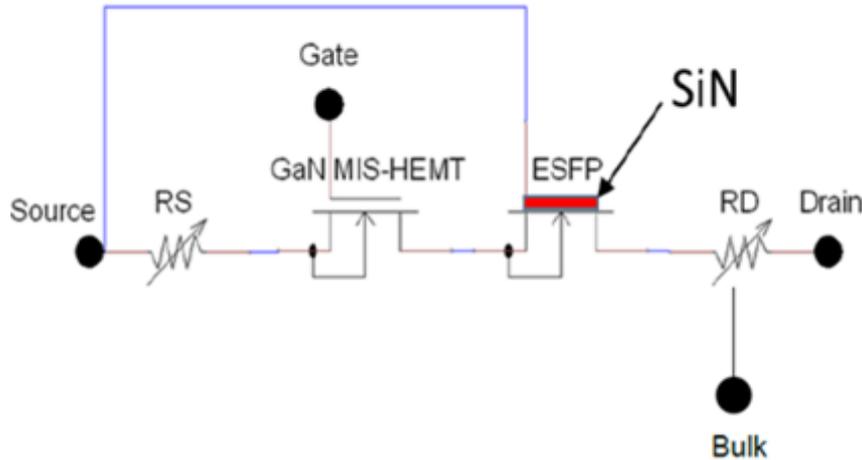
④ソースフィールドプレートトランジスタ

⑤インプリシットゲートアクセス領域トランジスタ





**SFPとGaN HEMTの真性  
トランジスタのみ**



- 2層MISゲート
- 埋め込みSFPを考慮

$$I_{ds} = W \cdot Q_{i,x0} \cdot v_x \cdot F_{sat}$$

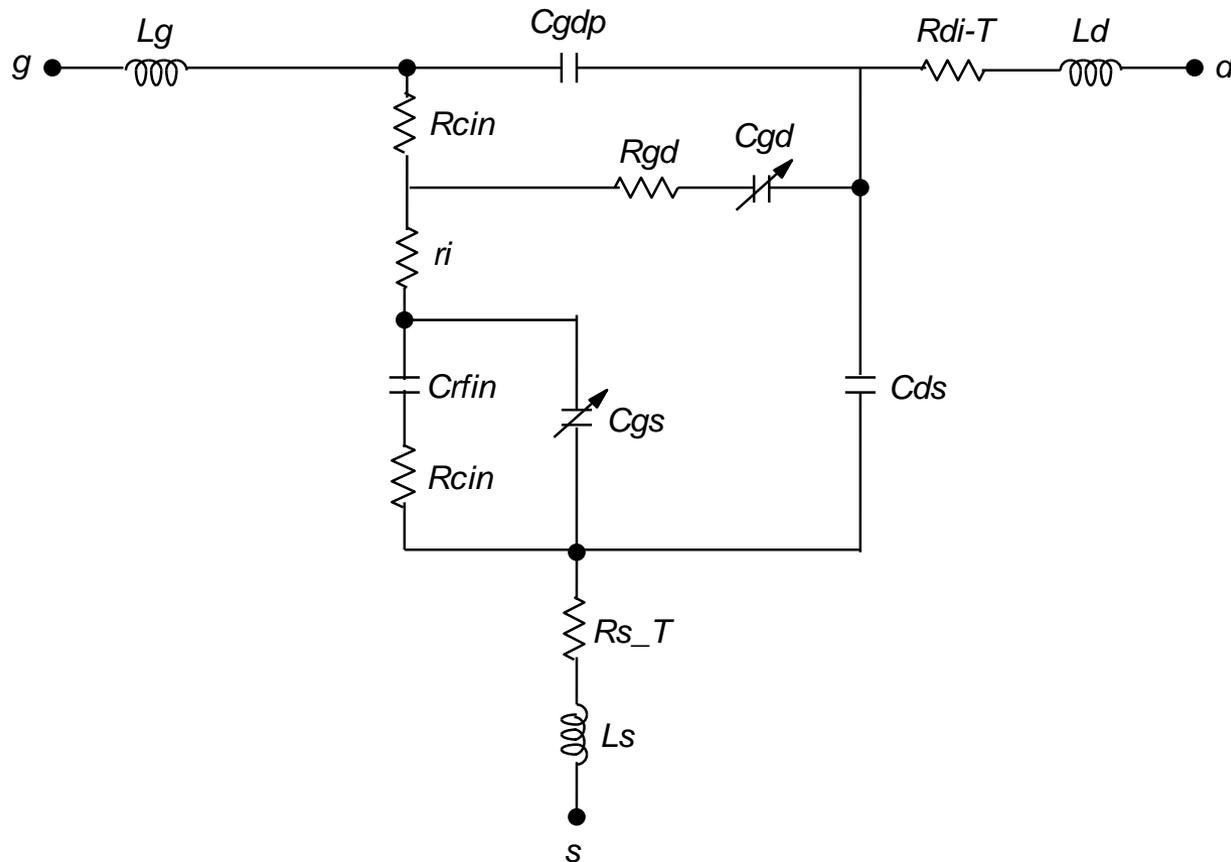
$$C_{fm} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$T_{fm} = T_1 + T_2$$

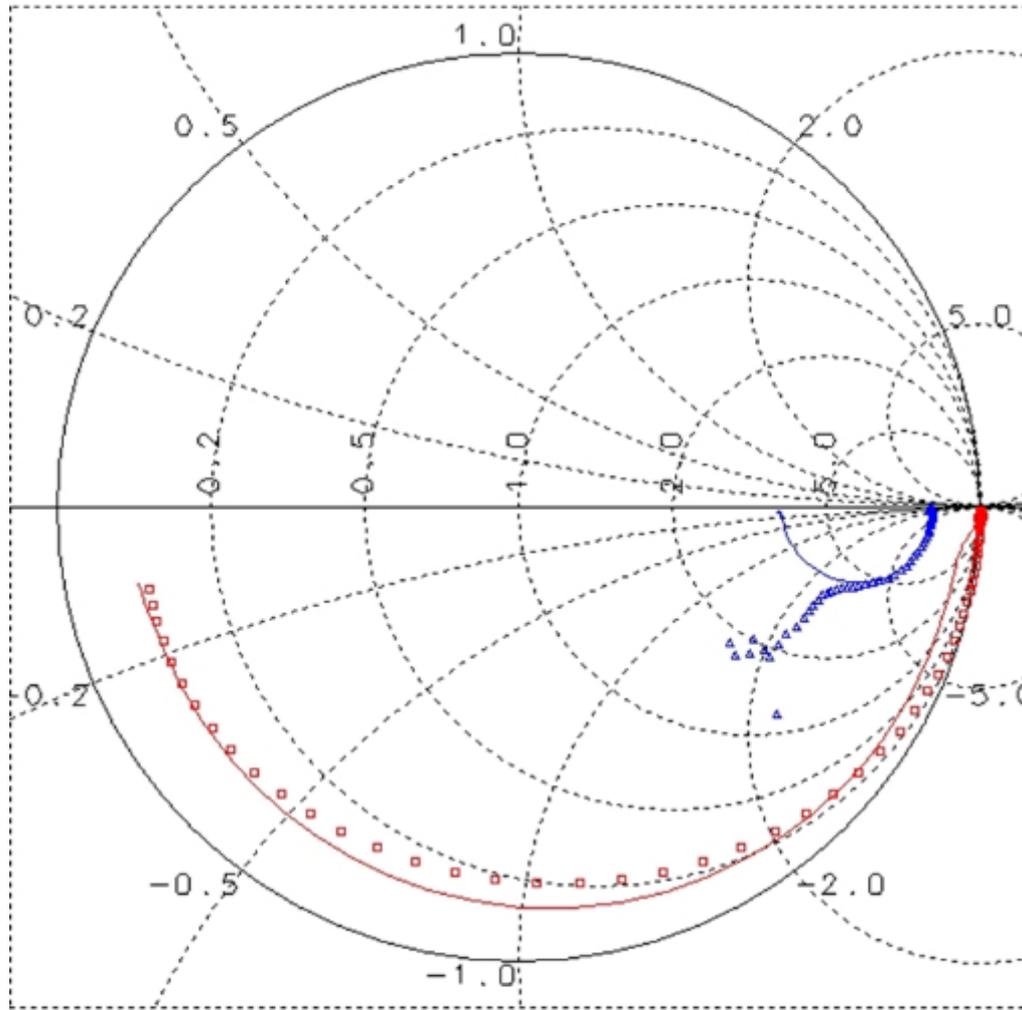
$$\varepsilon_{fm} = C_{fm} \cdot T_{fm}$$

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 \cdot U_{Leff}}{1 + U_{Gate} \cdot U_{SFP}}$$

提案したドレイン電流モデルに小信号等価回路を追加



等価回路をverilog-Aで記述、各素子をパラメータとし  
AC特性のモデルとする



**S11 (入力の反射特性)**  
**S22 (出力の反射特性)**

**Vgs=1.5V**

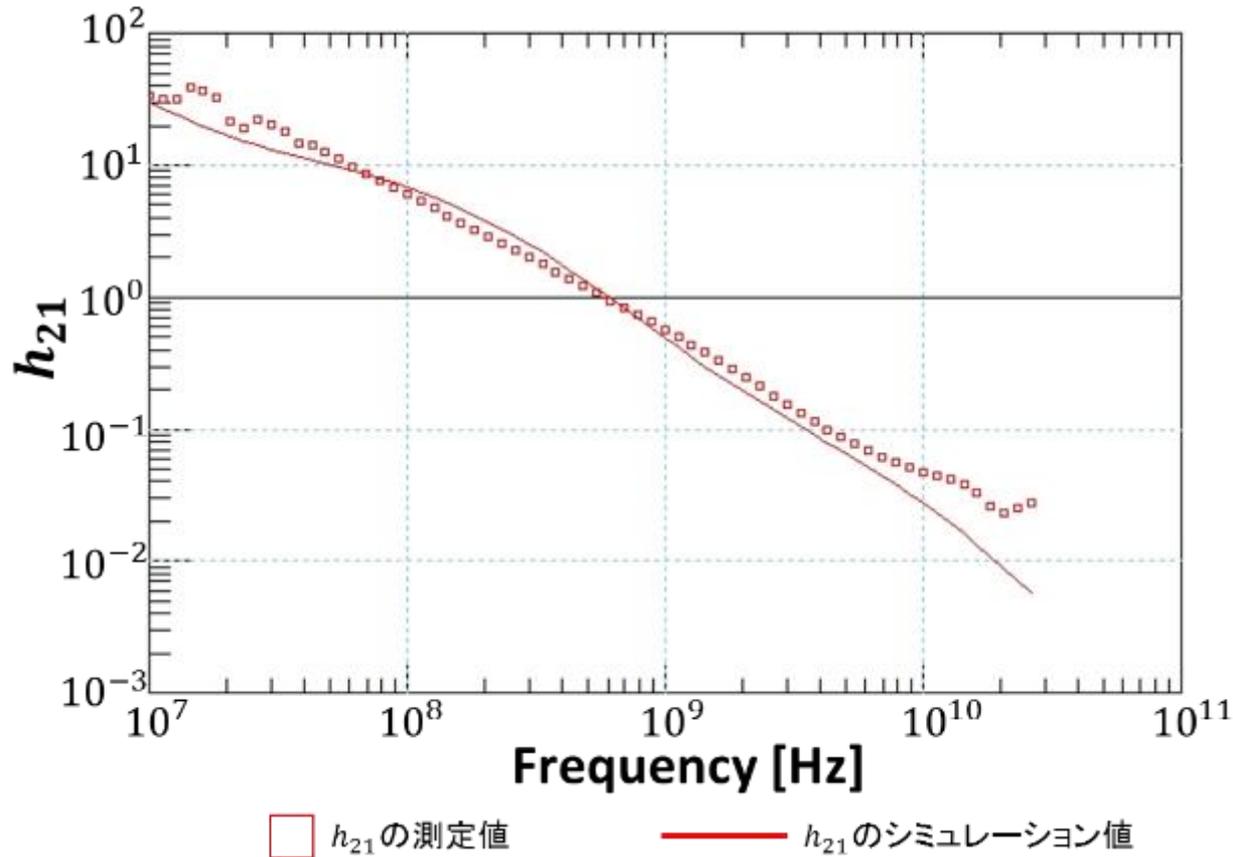
**Vds=1.5V**

**f=10MHz ~ 26GHz**

**HSPICEでシミュレーション**

**入力：ゲート**

**出力：ドレイン**



**$h_{21}$  : 入カー出力の  
電流利得**

**$V_{gs}=1.5V$**

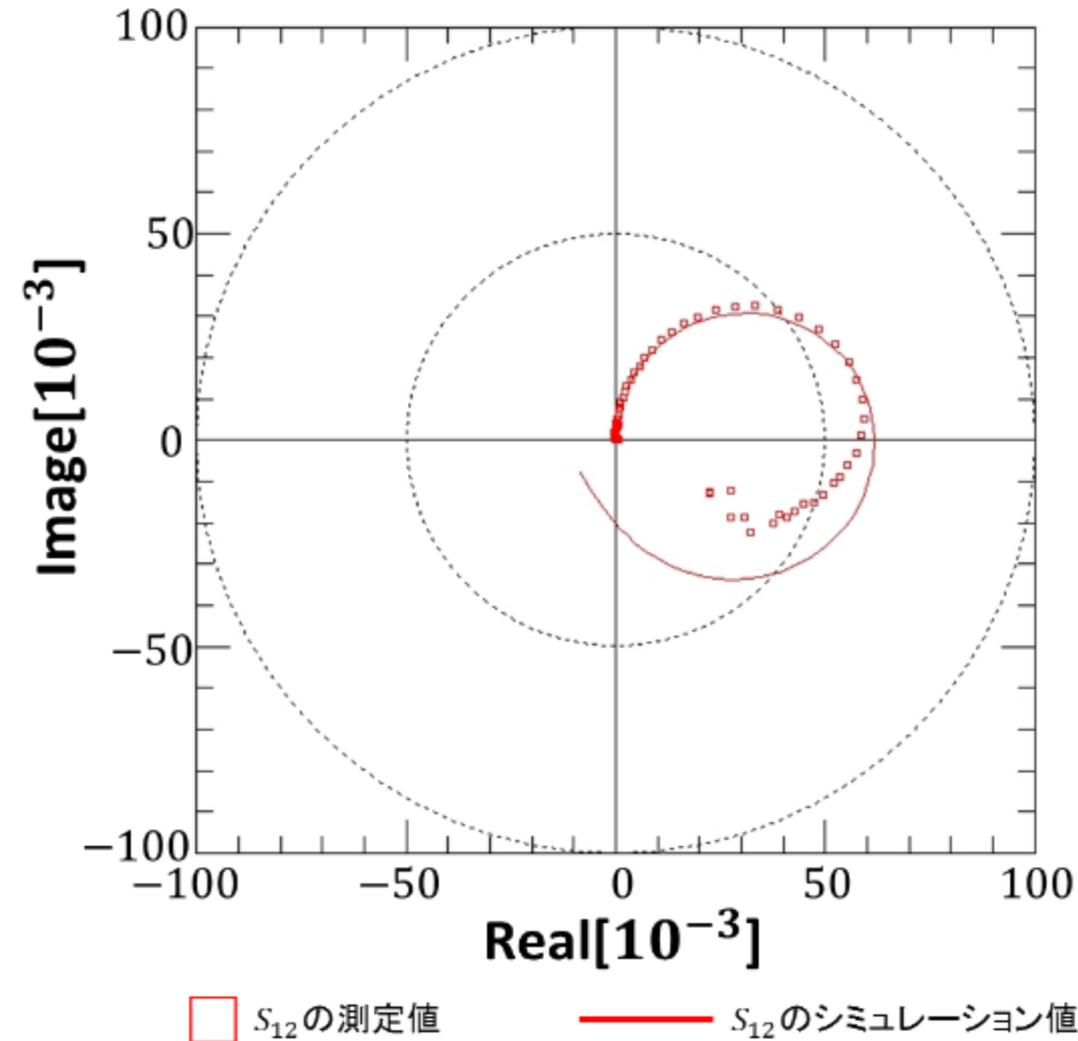
**$V_{ds}=1.5V$**

**$f=10MHz \sim 26GHz$**

**HSPICEでシ  
ミュレーション**

**入力 : ゲート**

**出力 : ドレイン**



**S12 : 出カ-入カの  
伝送特性**

**Vgs=1.5V**

**Vds=1.5V**

**f=10MHz ~ 26GHz**

**HSPICEでシ  
ミュレーション**

**入力 : ゲート**

**出力 : ドレイン**

- 研究背景、目的
- 埋め込みソースフィールドプレートを有するAlN/GaN MIS-HEMT
- 等価回路によるAC特性モデル
- まとめ

- **パワー用GaN HEMTのモデル開発**
  - **パワー用MIS GaN HEMTの構成**
  - **MIT Virtual Source Modelを用いたモデル開発**
  - **GaN HEMT 等価回路を用いたAC特性モデルの実装**

- Appendix

$$I_{ds} = W \cdot Q_{i,x0} \cdot v_x \cdot F_{sat},$$

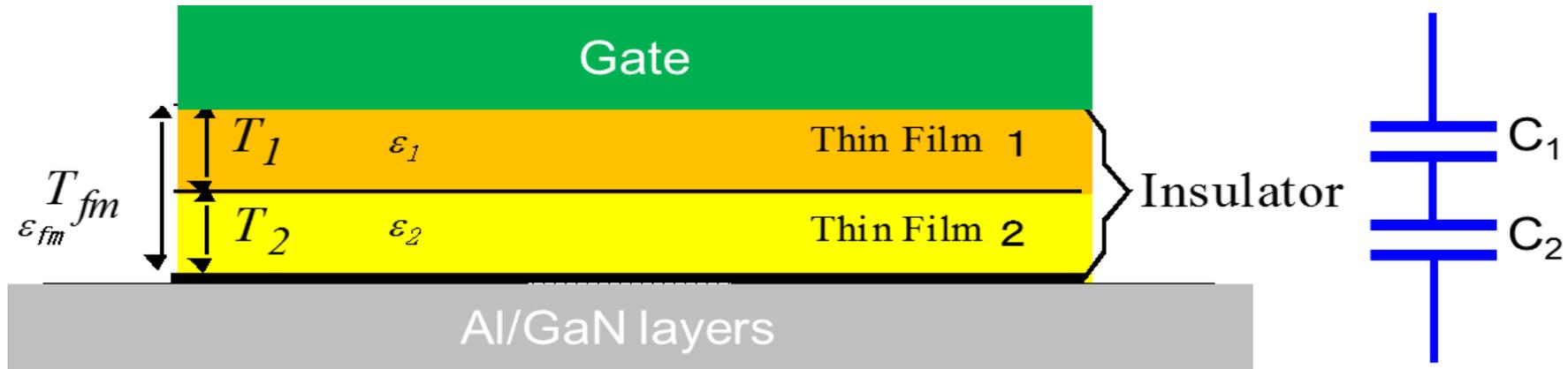
$$Q_{i,x0} = C_{fm} \cdot n \cdot \varphi_t \ln \left( 1 + e^{\frac{V_{gs} - (V_{th} - \alpha \cdot \varphi_t \cdot F_f)}{n \cdot \varphi_t}} \right),$$

$$v_x = \frac{v_{x0}}{1 + \theta \frac{Q_{i,x0}}{C_{fm}}} (1 - \eta \cdot I_{ds} \cdot V_{ds})$$

$$F_{sat} = \frac{V_{ds} / \theta_{sat}}{\left( 1 + \left( \frac{V_{ds}}{\theta_{sat}} \right)^\beta \right)^{1/\beta}},$$

$$n = \frac{SS}{\varphi_t \cdot \ln(10)} + n_d \cdot V_{ds},$$

$$V_{th} = V_{to} - V_{ds} (\delta - \delta_1 \cdot V_{ds}),$$



✳ MIS(Metal-Insulator-Semiconductor)

Total gate insulator film capacitance can be calculated as follows:

$$C_{fm} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_1}{T_1} \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_2}{T_2}$$

$$T_{fm} = T_1 + T_2 \quad \epsilon_{fm} = C_{fm} \cdot T_{fm}$$

**New!**

# Electron Mobility Model

24/20

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 \cdot U_{Leff}}{1 + U_{Gate} \cdot U_{SFP}}$$

Effective channel length  $U_{Leff} = 1.0 - UP \cdot e^{-L_{eff}/LP}$

Gate voltage  $U_{Gate} = UA \left( \frac{V_{gs} + 2 \cdot V_{th}}{T_{fm}} \right) + UB \left( \frac{V_{gs} + 2 \cdot V_{th}}{T_{fm}} \right)^2$

Source field plate  $U_{SFP} = 1 + USFP \cdot V_{ds}$

**New!**

# Electron Mobility Model

25/20

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 \cdot U_{Leff}}{1 + U_{Gate} \cdot U_{SFP}}$$

Surface  
Electric field

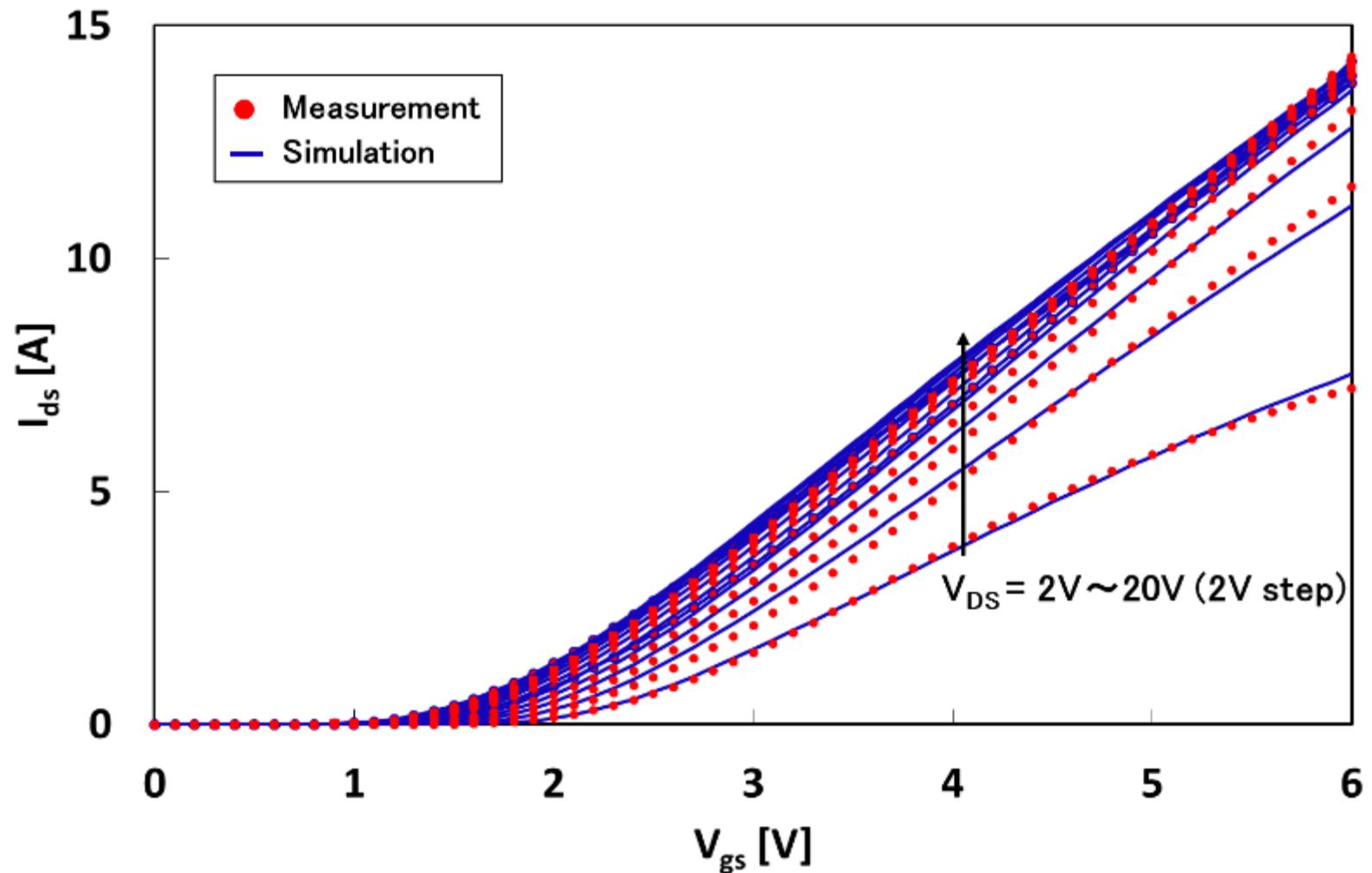
$$\mu_s = \frac{\mu_{eff}}{\sqrt{1 + \left(\frac{E_x}{E_c}\right)^2}} = \frac{\mu_{eff}}{\sqrt{1 + \theta_{sat}^2 \cdot \psi_{ds}^2}}$$

Temperature

$$\mu_{eff\_temp} = \frac{\mu_s}{\left(\frac{T_{dev}}{T_{nom}}\right)^\varepsilon}$$

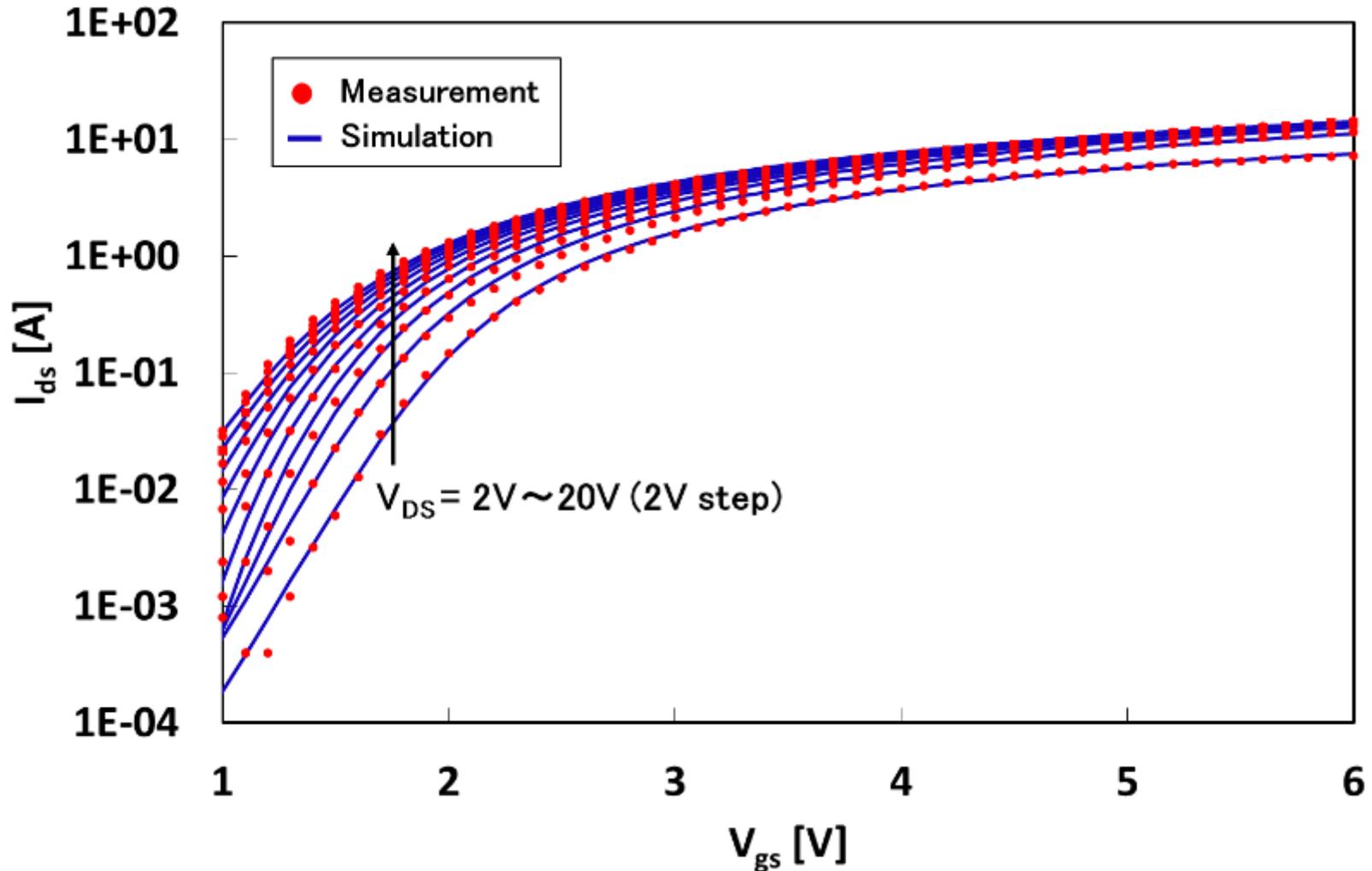
# $I_{ds}$ - $V_{gs}$ Characteristics

## Saturation region



# Log ( $I_{ds}$ )- $V_{gs}$ Characteristics

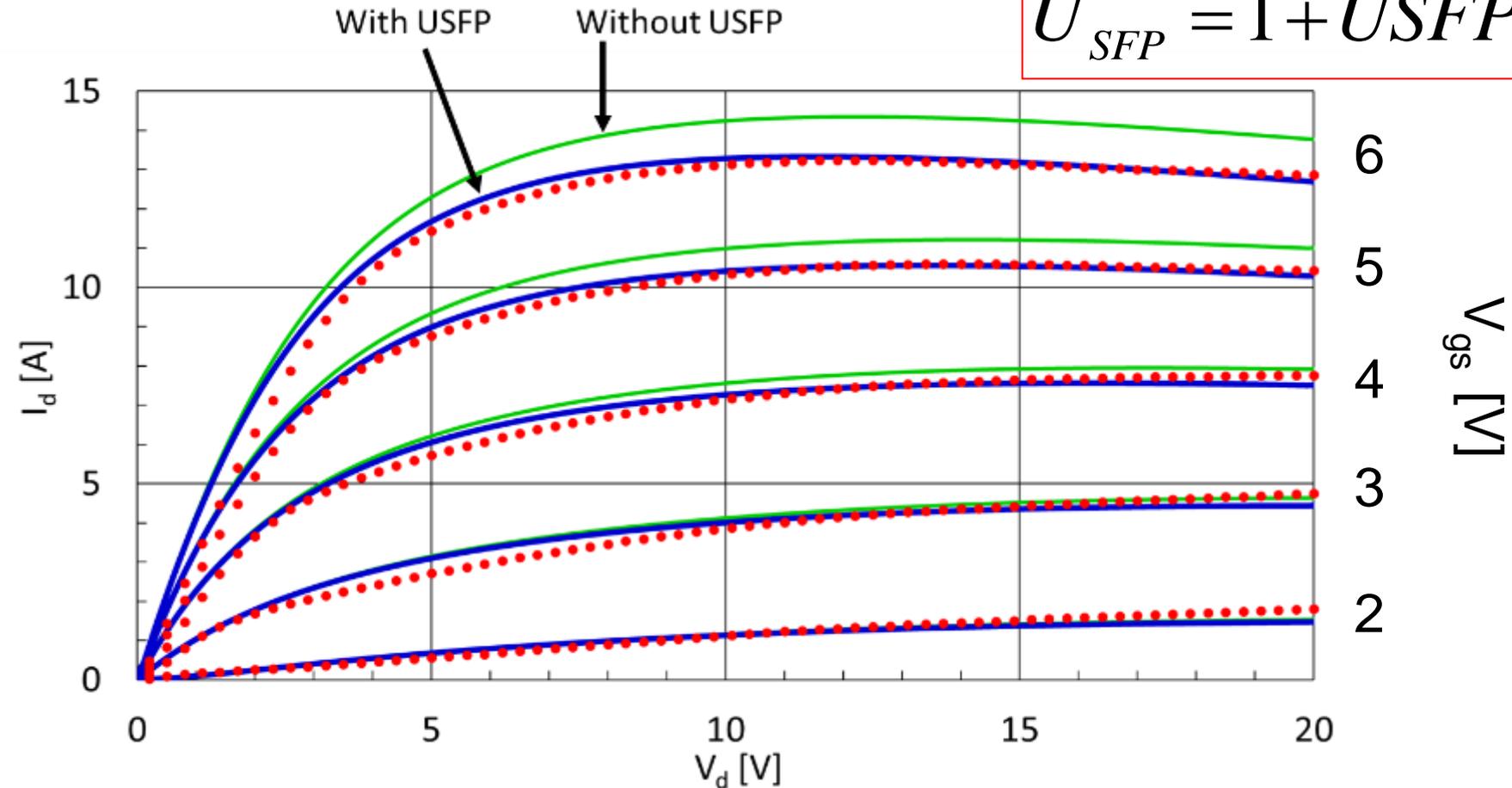
## Saturation region



## Saturation region

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 \cdot U_{Leff}}{1 + U_{Gate} \cdot U_{SFP}}$$

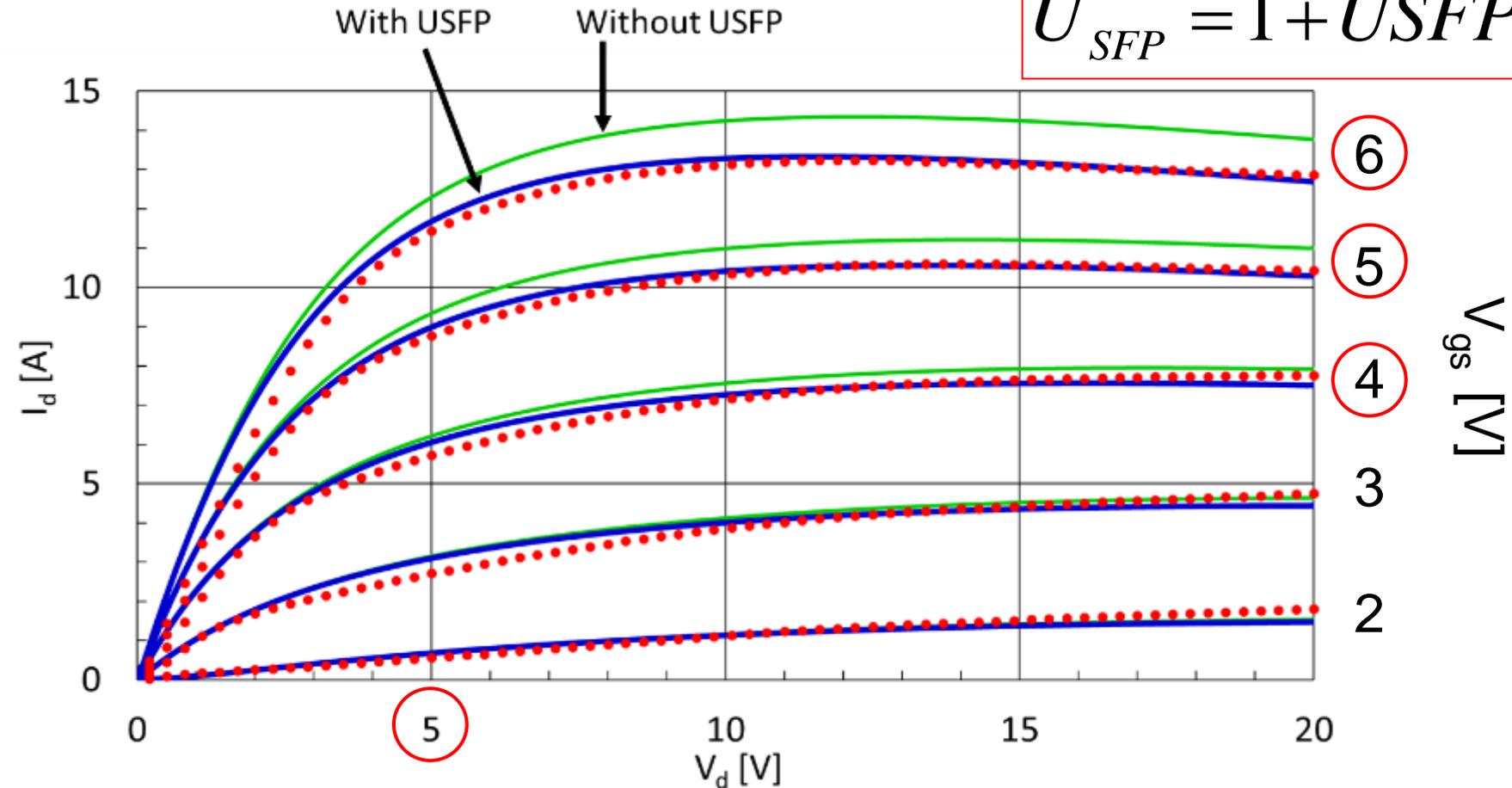
$$U_{SFP} = 1 + USFP \cdot V_{ds}$$



## Saturation region

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 \cdot U_{Leff}}{1 + U_{Gate} \cdot U_{SFP}}$$

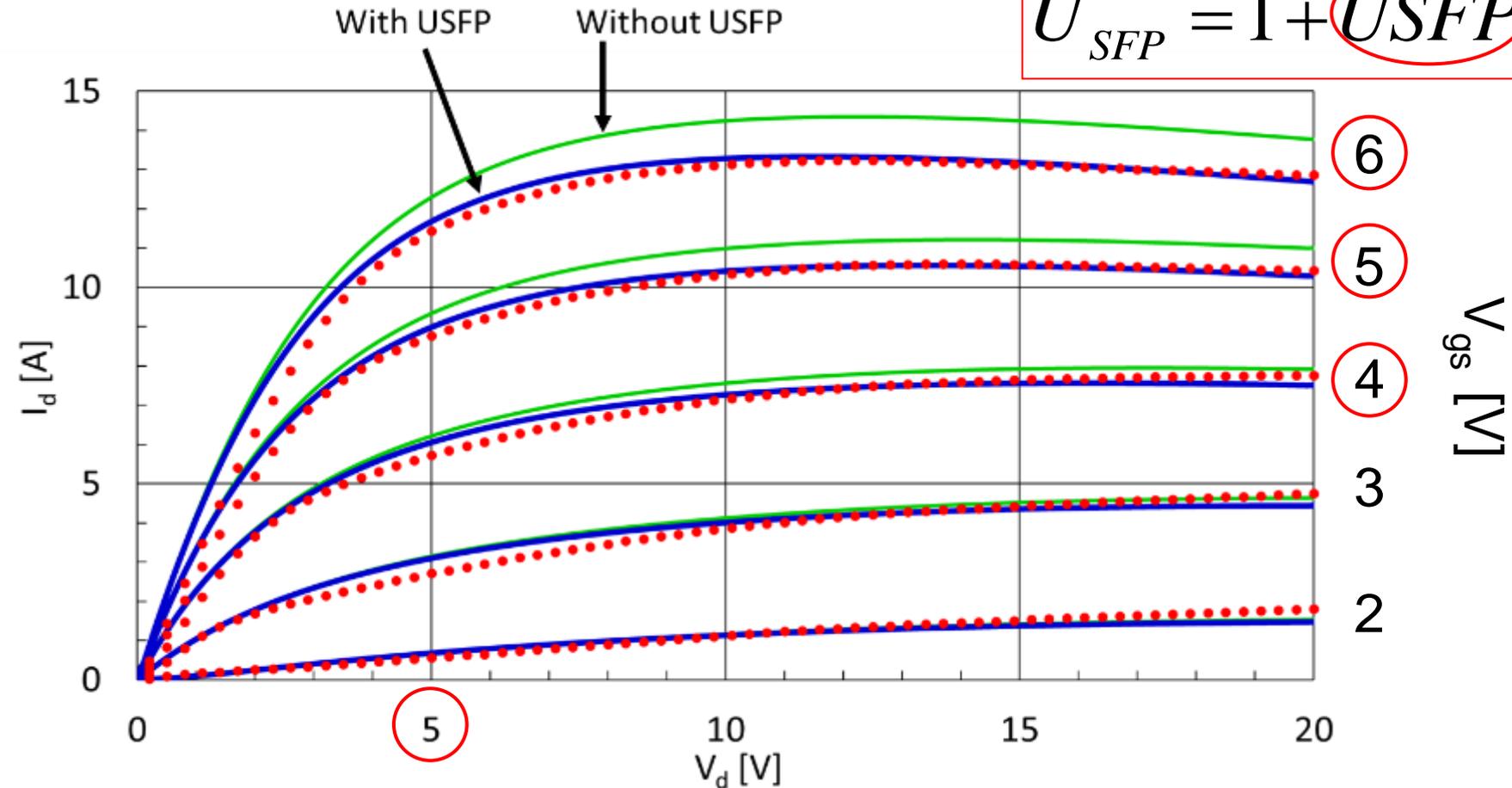
$$U_{SFP} = 1 + USFP \cdot V_{ds}$$



## Saturation region

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 \cdot U_{Leff}}{1 + U_{Gate} \cdot U_{SFP}}$$

$$U_{SFP} = 1 + \text{USFP} \cdot V_{ds}$$



# 埋め込みソースフィールドプレートを有する AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HEMTデバイスの小信号AC特性モデルの開発

澁谷将平 青木均 築地伸和 栗原圭汰

東野将史 高橋莉乃

坂入寛之 黒田尚孝 近松健太郎 中原健

群馬大学 ローム株式会社

- S11の中間部分がずれている原因は？  
→低周波領域がパッドの寄生容量でずれてしまうため、低周波領域のずれを小さくしようとすると中間部分がずれる。中間部分だけを綺麗に追従させた場合、低周波領域でずれる。
- 論文中的表2のパラメータは測定結果に対して合わせこんだ値？それはやり方として正しいのか？  
→そうです。
- 今回の発表内容のほかにこのモデル開発でほかに気をつけないといけないことってある？  
→今回、GaN HEMTの測定結果に対してパラメータ抽出を行ったが、測定結果自体が寄生成分が残っているため、高周波の抽出、最適化が上手くできていない。こういった面も気をつけていく必要がある。