

# 先進パワーデバイスにおける 新規ゲート絶縁膜開発と 放射光利用MOS界面評価事例

転載不可

大阪大学大学院工学研究科  
渡部平司

# 概要

- **ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス**
- **SiCパワーデバイス開発**
  - 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
  - $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 界面エネルギーバンド構造
  - 窒化界面の評価と今後の課題
- **GaN-MOSデバイス開発**
  - AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
  - GaN表面の熱酸化過程評価
  - 極薄 $\text{GaO}_x$ 界面層によるMOS界面特性改善
- **まとめ**

# 概要

## ■ ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス

### ■ SiCパワーデバイス開発

- 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
- $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ 界面エネルギーバンド構造
- 窒化界面の評価と今後の課題

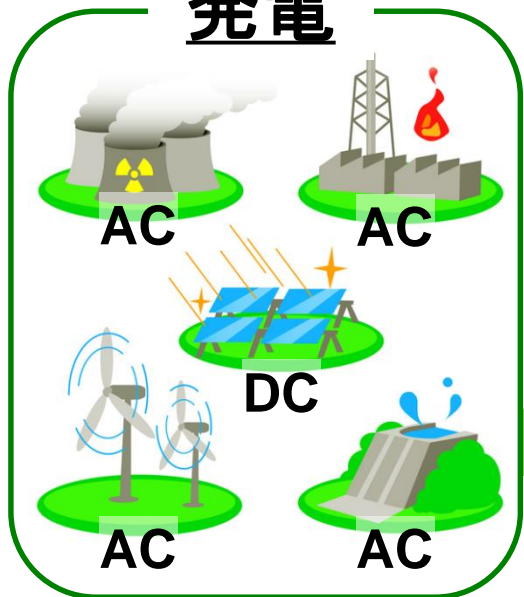
### ■ GaN-MOSデバイス開発

- AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
- GaN表面の熱酸化過程評価
- 極薄 $\text{GaO}_x$ 界面層によるMOS界面特性改善

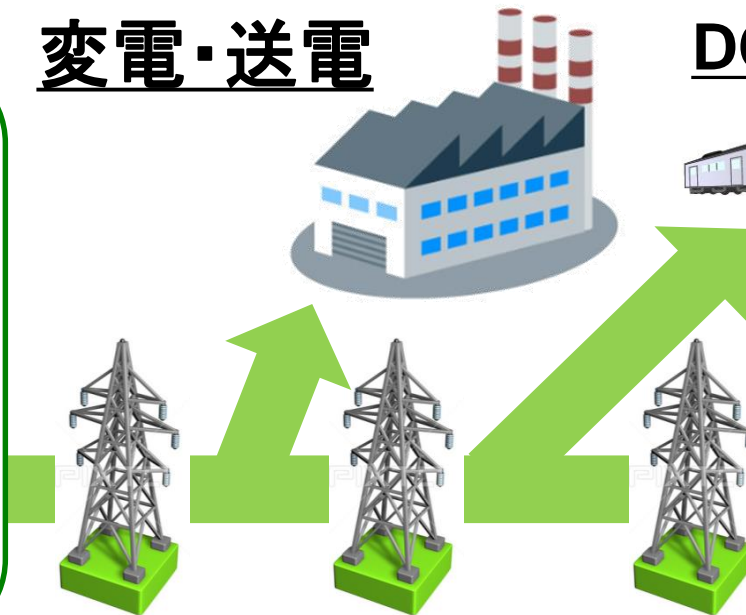
### ■ まとめ

# 研究背景

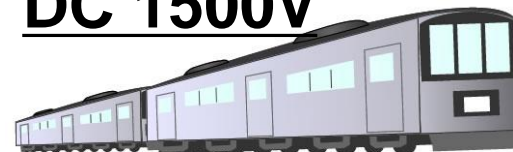
## 発電



## 変電・送電



## DC 1500V



## AC 100, 200V



## パワーデバイス

### :電力変換

※低損失・高温動作

## LSI: 情報処理

※高速動作・低消費電力

## AC 100V

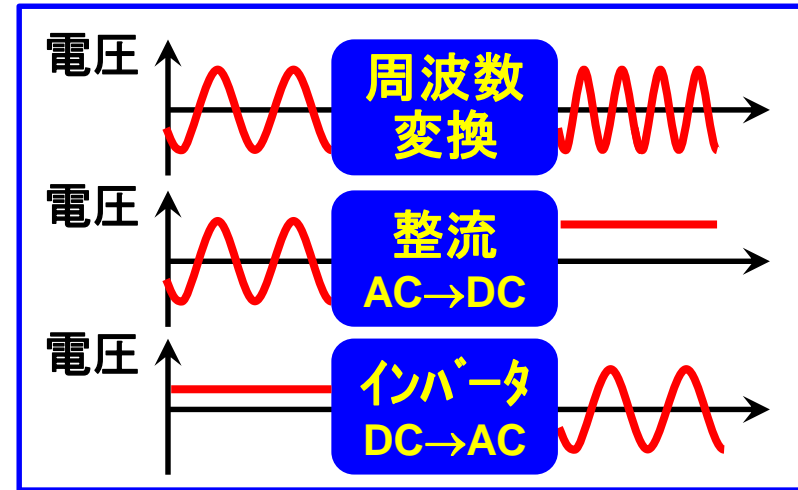
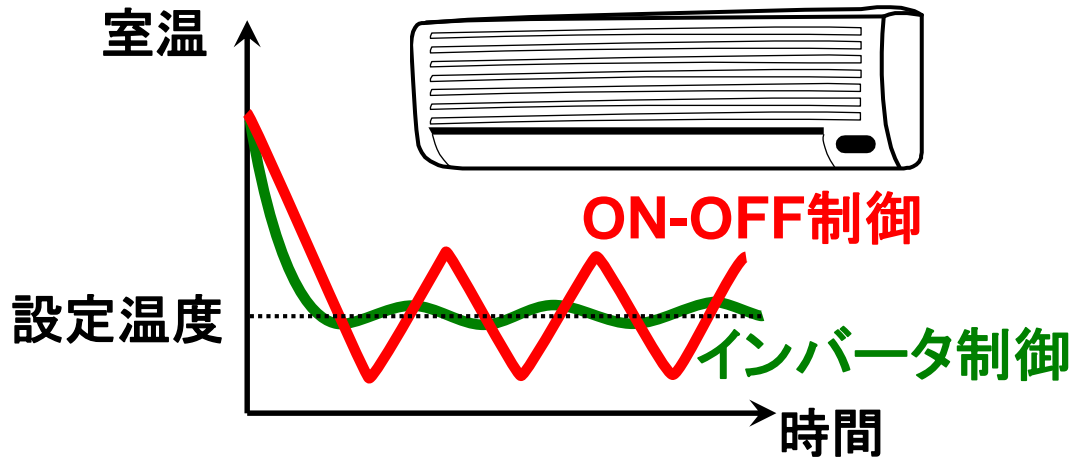
## DC 10~20V

## DC 3.3~12V

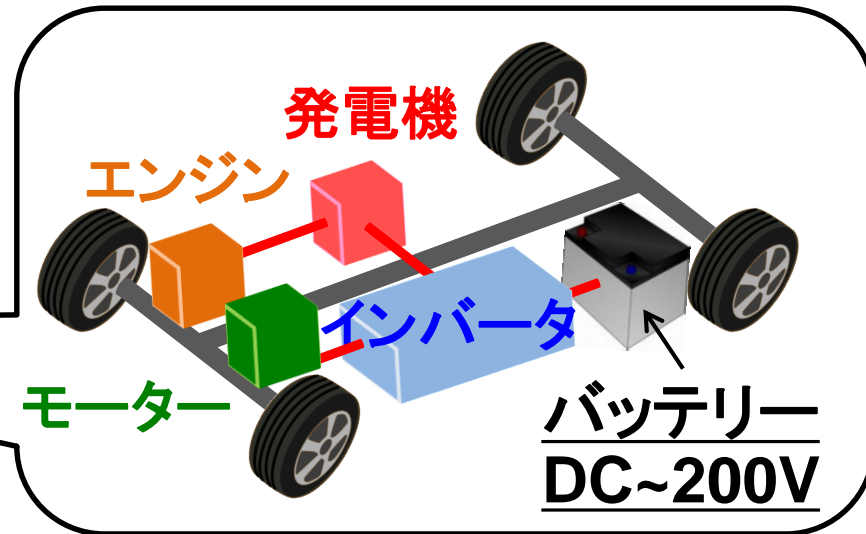


# 電力変換装置の例 ~インバータ~

## ➤ インバータエアコン

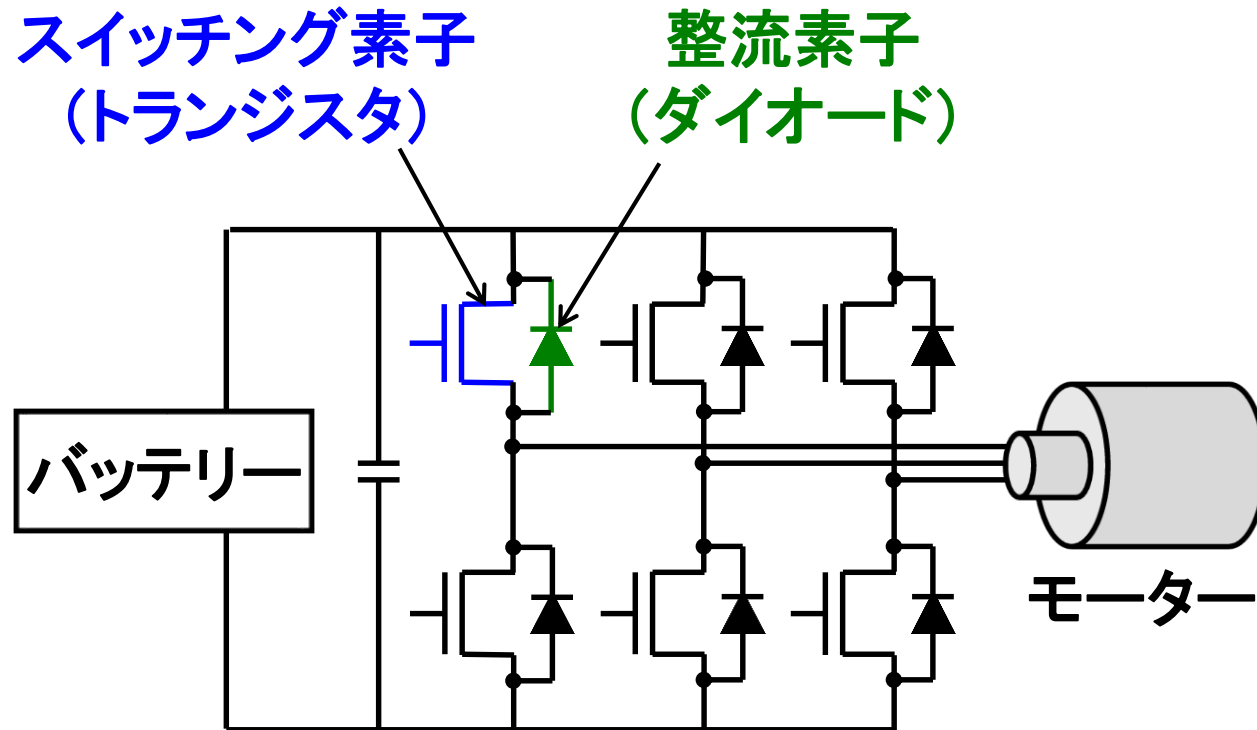


## ➤ 電気自動車・ハイブリッドカー



# インバータを構成するパワー半導体素子

## ➤ 整流素子とスイッチング素子から構成

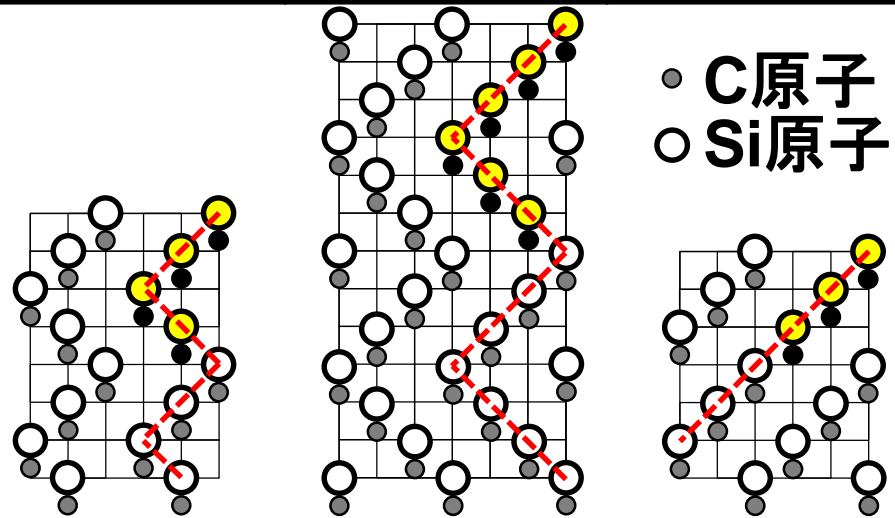


**シリコンだと極限環境下で使用不可  
&材料物性で決まる性能限界に到達**

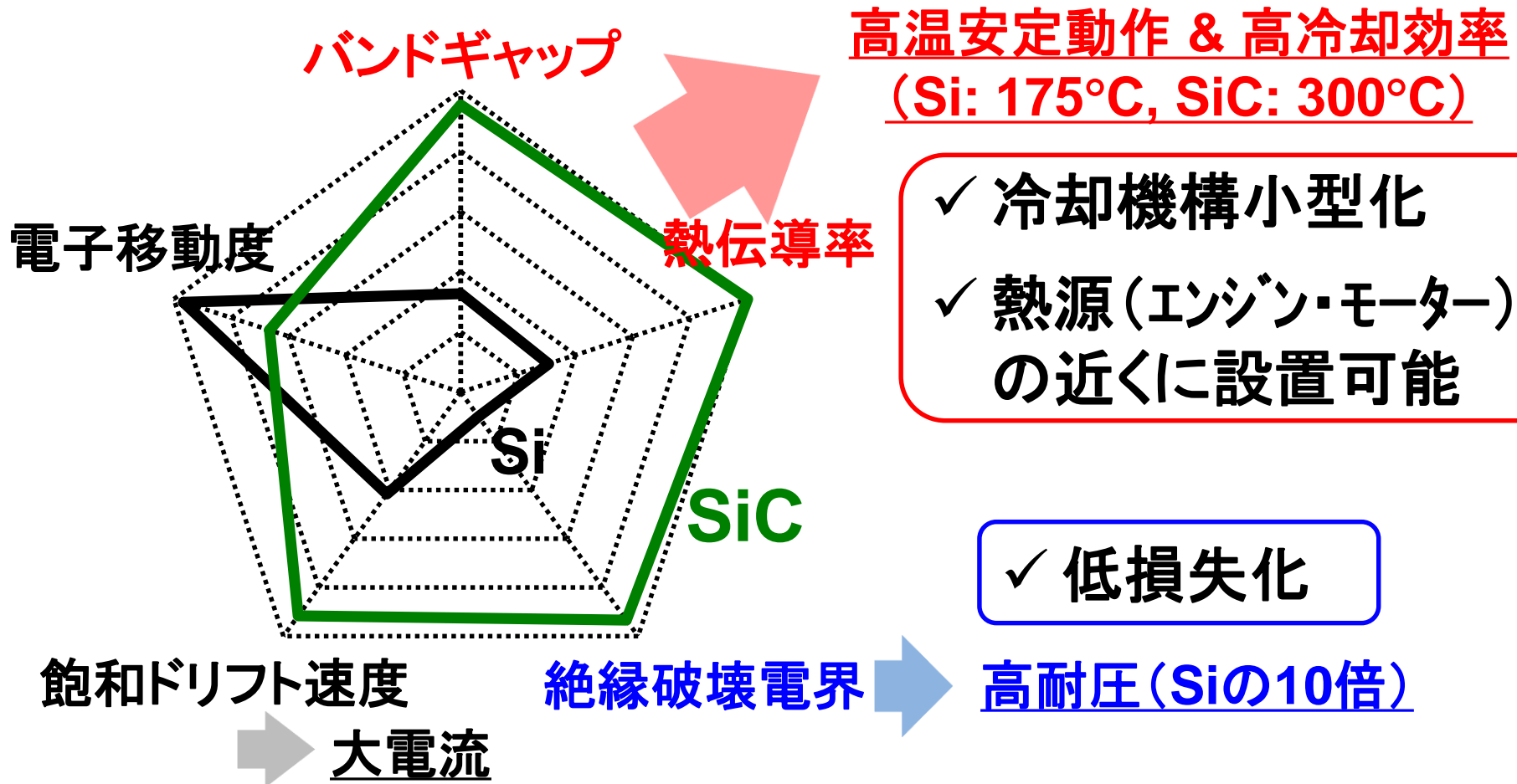
# シリコンカーバイド(SiC)の結晶構造

結晶構造	4H	6H	3C
バンドギャップ (eV)	3.26	3.02	2.23
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	1000	450	1000
絶縁破壊電界 (MV/cm)	2.8	3.0	1.5
飽和ドリフト速度 (cm/s)	2.2×10 <sup>7</sup>	1.9×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>
比誘電率	9.7	9.7	9.7
熱伝導率 (W/cmK)	4.9	4.9	4.9

ウェハ供給(エピ成長含む)  
と物性の観点から  
4Hが主流



# SiとSiCの物性比較



- ✓ 冷却機構小型化
- ✓ 熱源 (エンジン・モーター) の近くに設置可能

✓ 低損失化

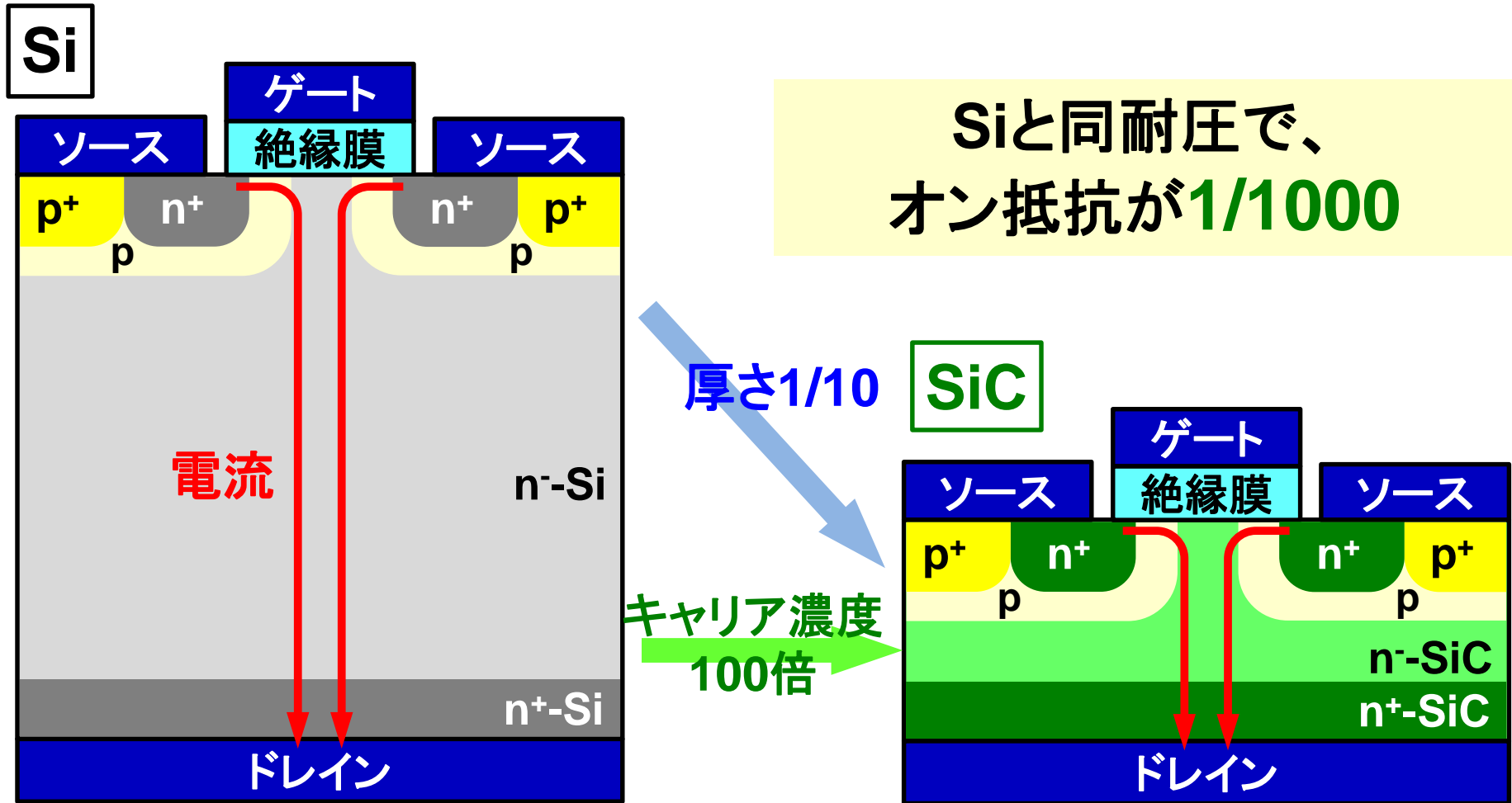
さらにSiとの類似点として

- ✓ 熱酸化によるSiO<sub>2</sub>形成
- ✓ ドーピングによるp/n制御



# SiCによる低損失化 ~縦型MOSFET~

## DMOSTランジスタ

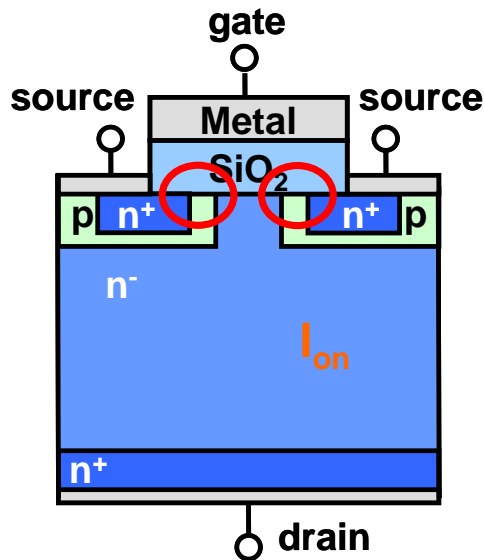


# 概要

- ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス
- SiCパワーデバイス開発
  - 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
  - SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造
  - 窒化界面の評価と今後の課題
- GaN-MOSデバイス開発
  - AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
  - GaN表面の熱酸化過程評価
  - 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善
- まとめ

# 熱酸化SiC-MOSデバイスの課題

## ➤ SiC-MOSFET



- Normally-off スwitchングデバイス
- 熱酸化によるSiO<sub>2</sub>ゲート絶縁膜形成

- 反転層チャネル移動度の劣化
- ゲート絶縁膜信頼性劣化
- ゲートリーク電流増大((000-1)<sub>C</sub>面)
- 閾値低下と閾値変動の問題 ...

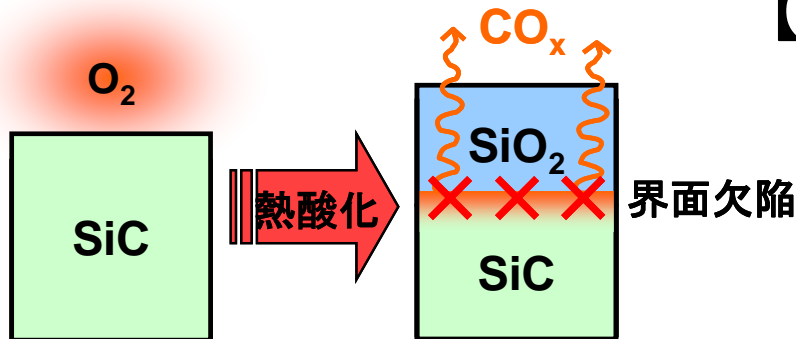
### 【物理的要因】

界面遷移層、炭素不純物

エピ層中結晶欠陥

MOS界面のラフネス

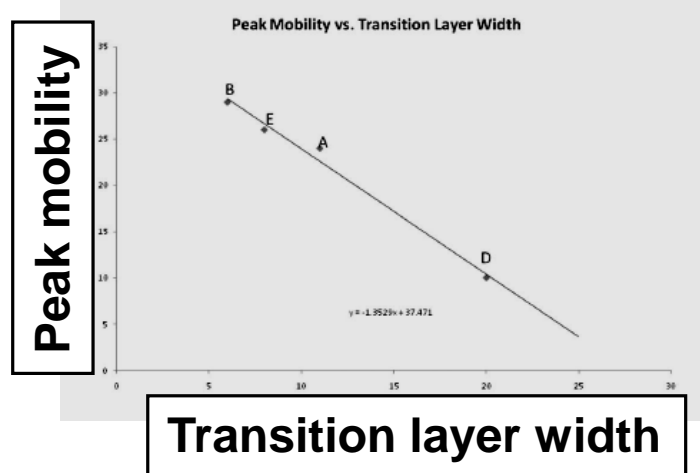
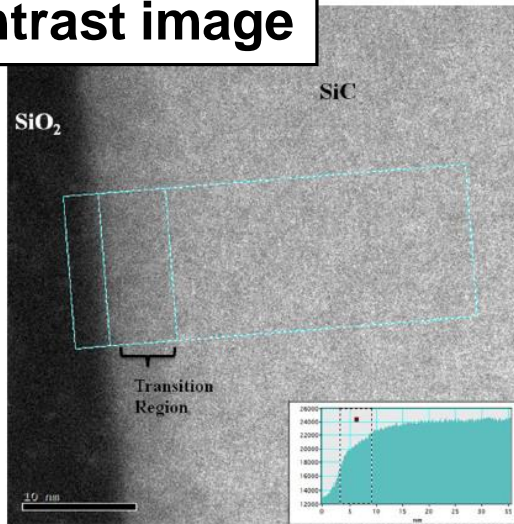
伝導帯オフセット減少 ...



# 熱酸化SiO<sub>2</sub>ゲート絶縁膜の問題

T.L. Biggerstaff *et al.*, Appl. Phys. Lett. 95, 032108 (2009).

Z-contrast image

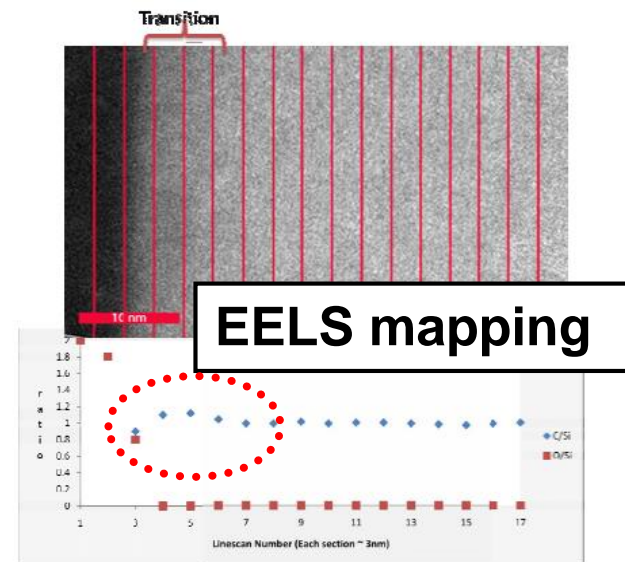


- Thick transition layer (~nm)
- C-rich layer (~20%)
- Correlation with mobility degradation in SiC-MOSFET



Abrupt 4H-SiC/SiO<sub>2</sub> interface (MEIS)

X. Zhun *et al.*, Appl. Phys. Lett. 97, 071908 (2010).



# 放射光実験施設 (SPring-8 BL23SU)

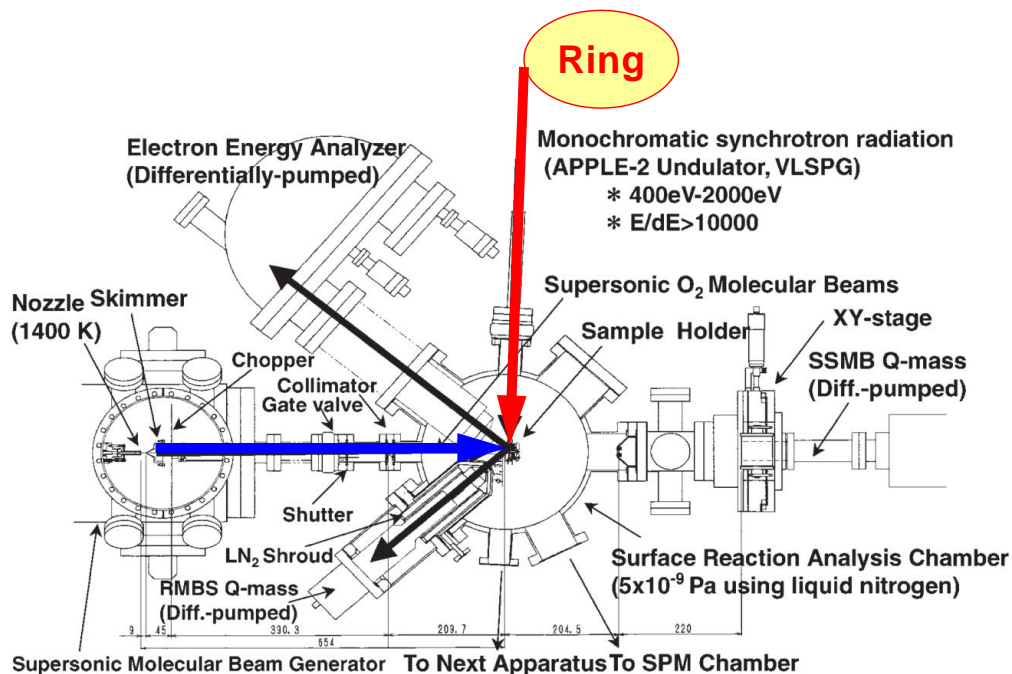
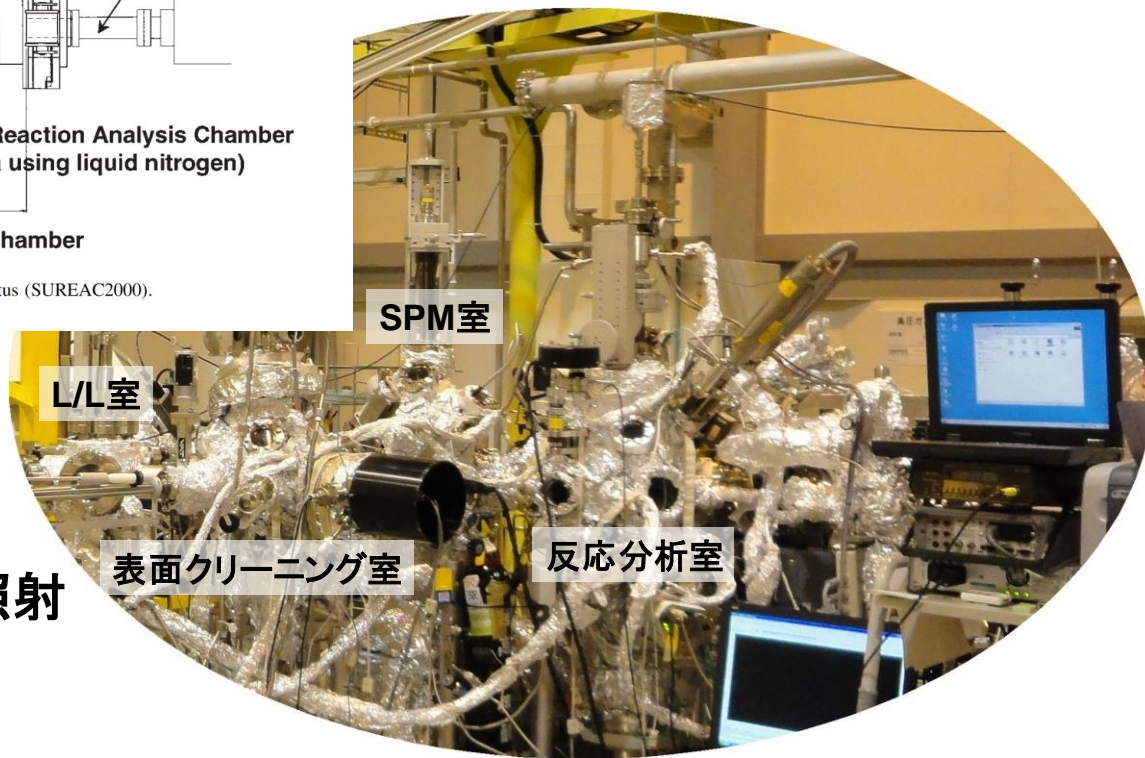


Fig. 1. Cross-sectional top view of the surface reaction analysis apparatus (SUREAC2000).

日本原子力研究開発機構  
吉越章隆 博士

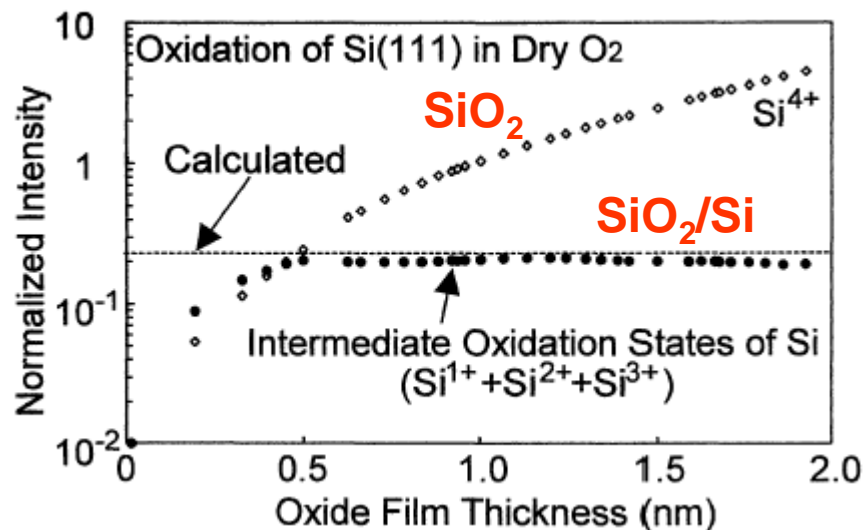
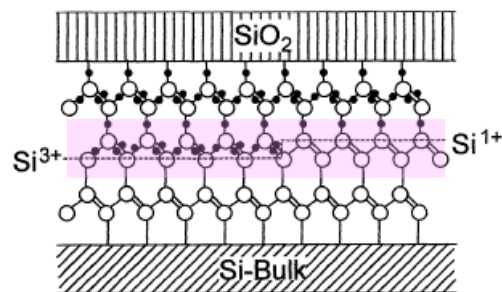
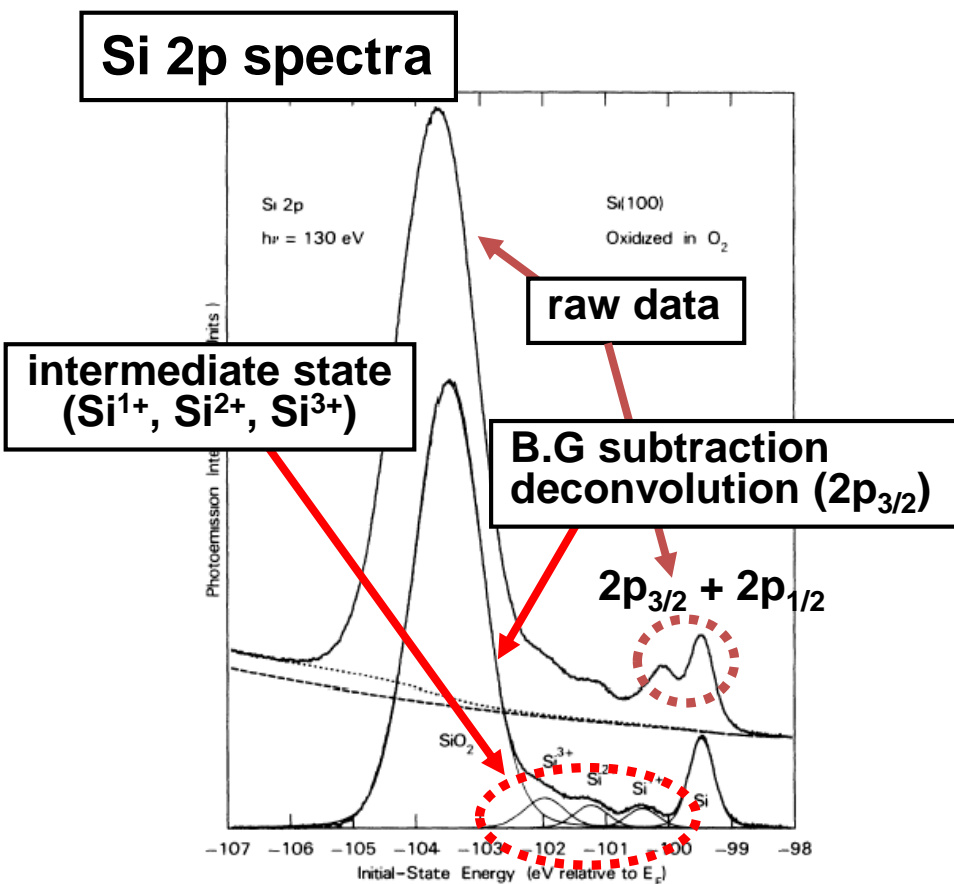


- ・ 放射光XPS
- ・ LEED/SPM複合分析
- ・ 超音速分子線(反応ガス)照射
- ・ 真空アニール

# 光電子分光法によるSiO<sub>2</sub>/Si界面先行研究

➤ Si2p高分解能測定 ⇒ スピン分離(2p<sub>3/2</sub>, 2p<sub>1/2</sub>) ⇒ サブオキサイド分離(Si<sup>1+</sup>~Si<sup>3+</sup>)  
F. J. Himpsel *et al.*, Phys. Rev. **B38**, 6084 (1988).

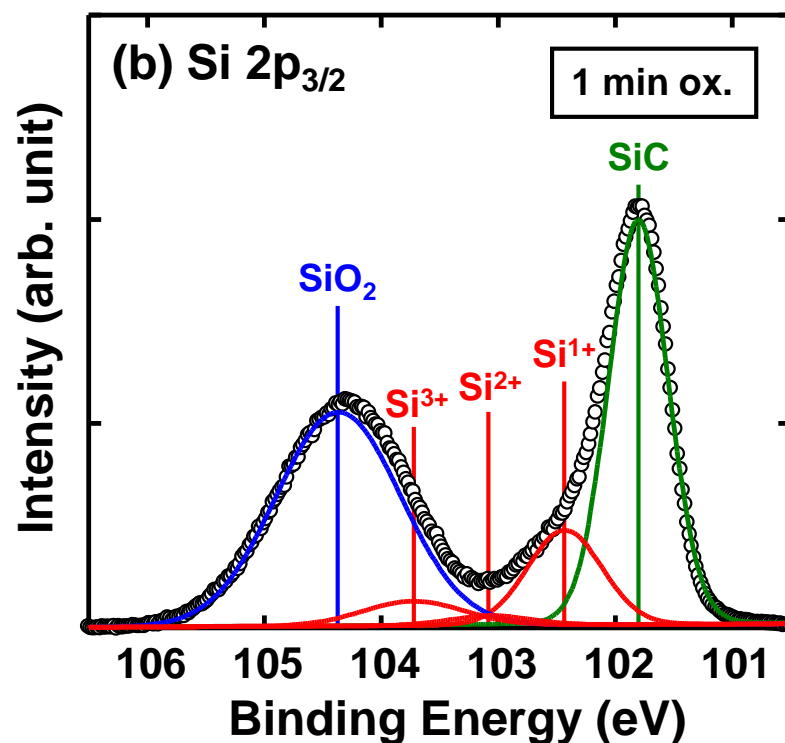
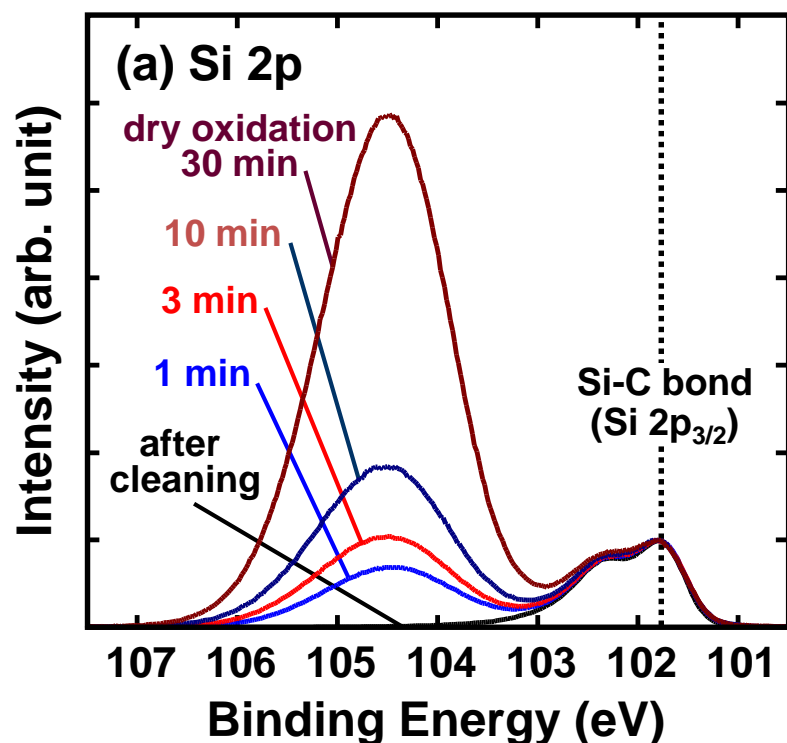
➤ SiO<sub>2</sub>/Si界面の急峻性評価 ⇒ 原子層毎酸化反応  
K. Ohishi and T. Hattori, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, L675 (1994).



# 熱酸化SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面の放射光XPS分析

H. Watanabe *et al.*, Appl. Phys. Lett. 99, 021907 (2011).

ウェット洗浄4H-SiC(0001)<sub>Si</sub>面のドライ酸化@1100°C(~30min)  
(例えば10分酸化⇒3.5nm(電気特性評価))

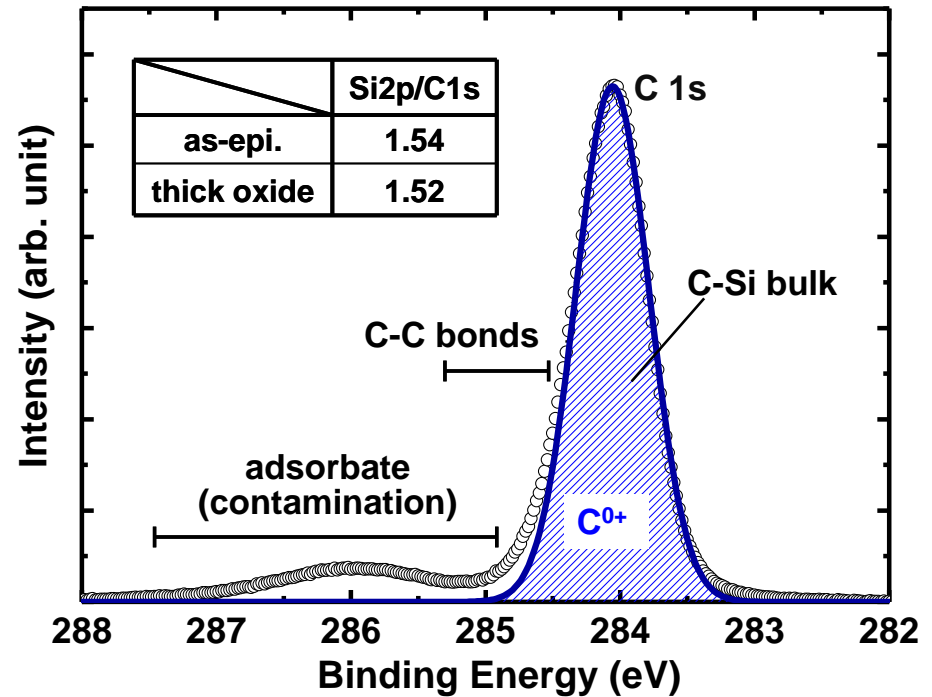
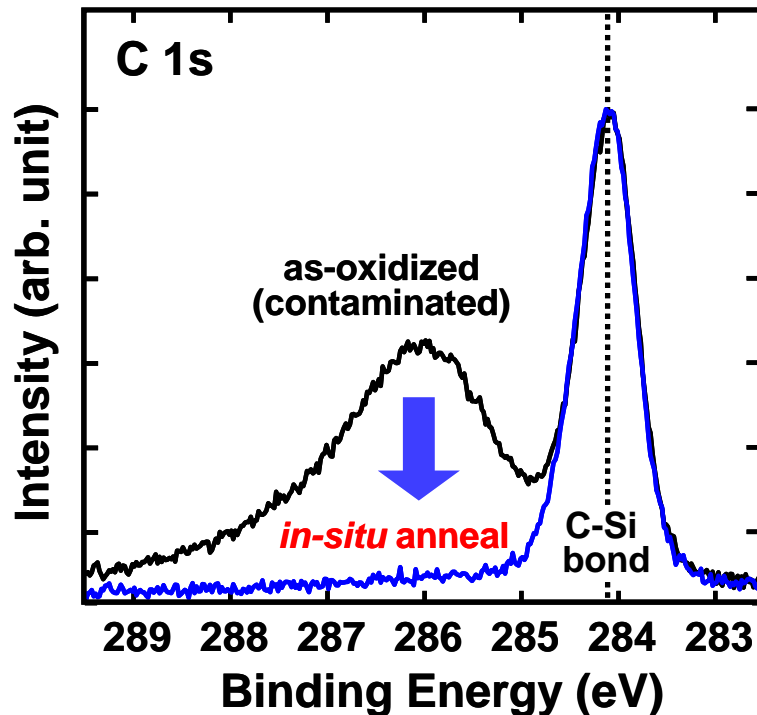


・SiC-MOS界面に厚い構造遷移層は存在しない(原子レベルで急峻)

# 熱酸化SiO<sub>2</sub>/4H-SiC界面の放射光XPS分析

H. Watanabe et al., Appl. Phys. Lett. 99, 021907 (2011).

炭素との結合に注目(真空加熱により表面吸着物除去 @500°C)



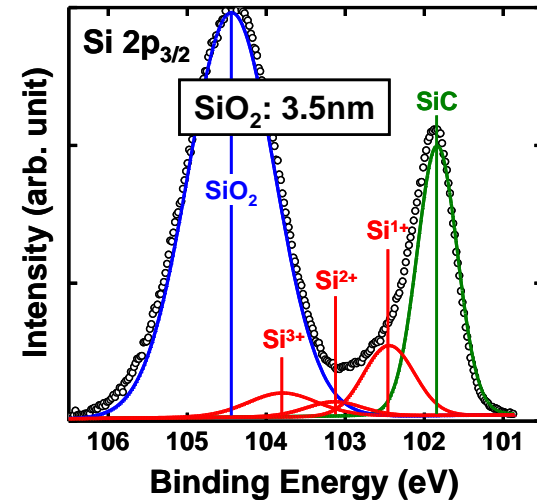
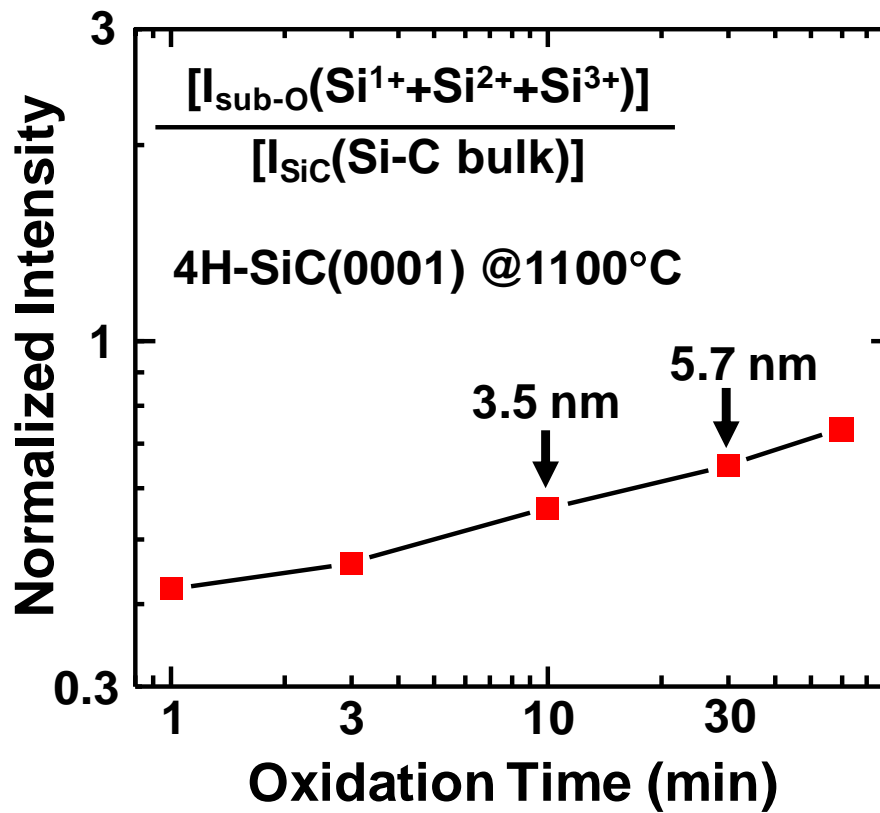
- ・ 熱酸化SiO<sub>2</sub>/SiC界面は主にSi-O結合で構成されている
- ・ C-rich層の存在は確認されない



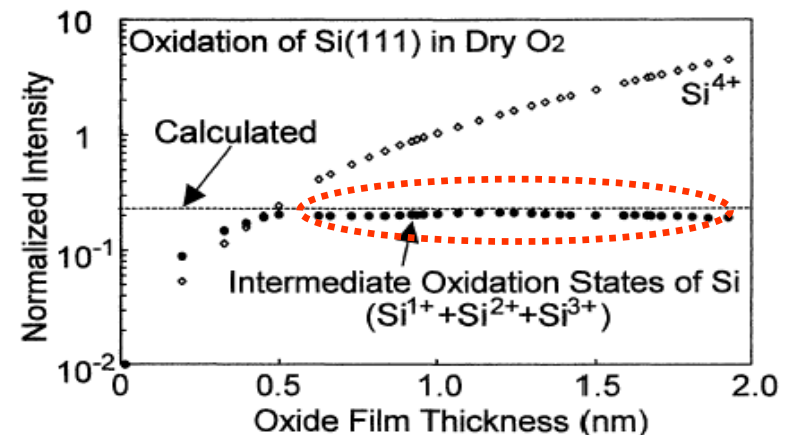
# 熱酸化SiO<sub>2</sub>/SiC界面の急峻性

H. Watanabe *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 021907 (2011).

Si2p<sub>3/2</sub> サブオキサイド成分の  
熱酸化膜厚依存性 (< 10nm)



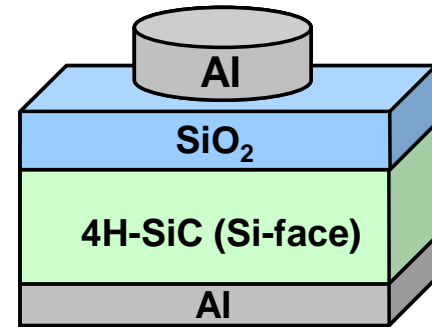
SiO<sub>2</sub>/Si interface



# SiC-MOSキャパシタの評価

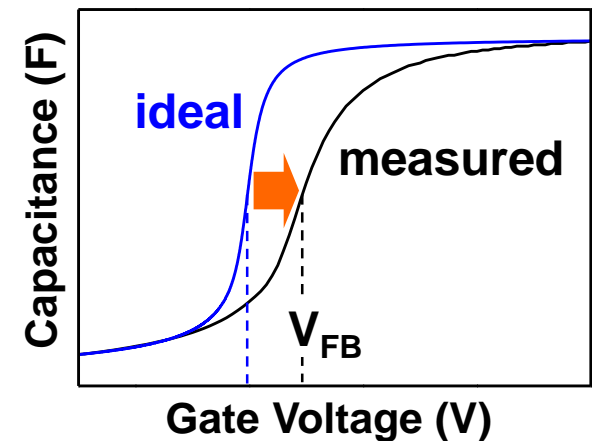
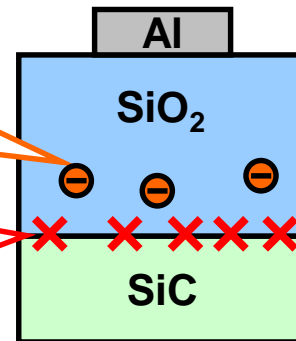
## Fabrication of SiC-MOS capacitor

- Dry oxidation (Si-face @1100°C)
- Post oxidation annealing @900°C
- Gate electrode (Al)
- Back contact (Al)
- C-V measurement (@1MHz)



**Fixed oxide charge ( $Q_{ox}$ )**  
← Flatband voltage ( $V_{FB}$ ) shift

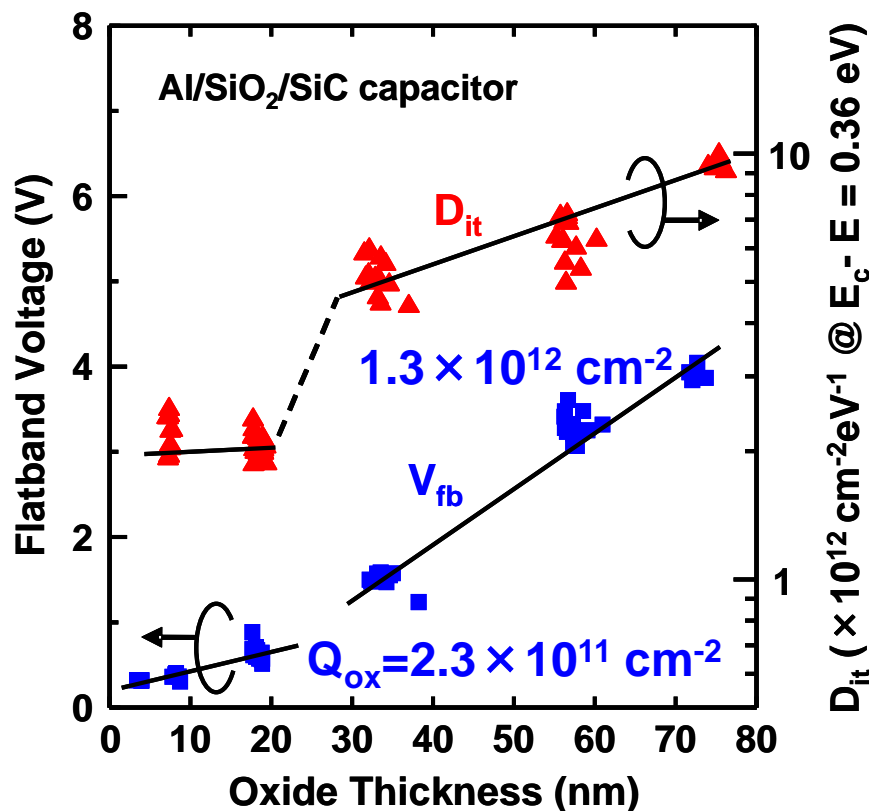
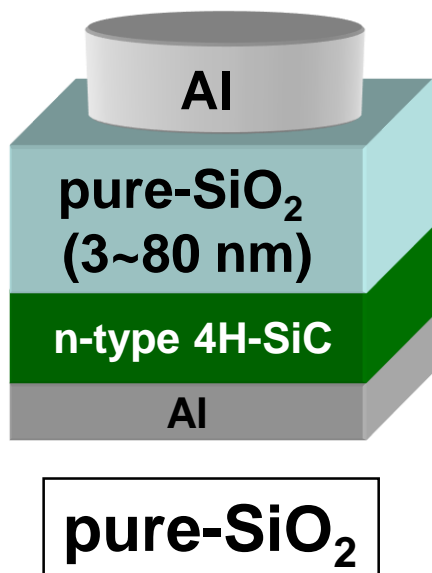
**Interface state density ( $D_{it}$ )**  
← C-V slope (Terman method)



# SiO<sub>2</sub>/SiC界面電気特性の酸化膜厚依存性

H. Watanabe et al., Appl. Phys. Lett. 99, 021907 (2011).

SiC-MOSキャパシタのC-V特性から界面欠陥準位密度(D<sub>it</sub>)  
と固定電荷(Q<sub>ox</sub>)を算出



熱酸化の進行に伴い電気特性を劣化させる界面欠陥が蓄積  
(厚膜で特性劣化が顕著 ←微量の炭素クラスタが原因?)

# 概要

## ■ ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス

### ■ SiCパワーデバイス開発

- 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
- **SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造**
- 窒化界面の評価と今後の課題

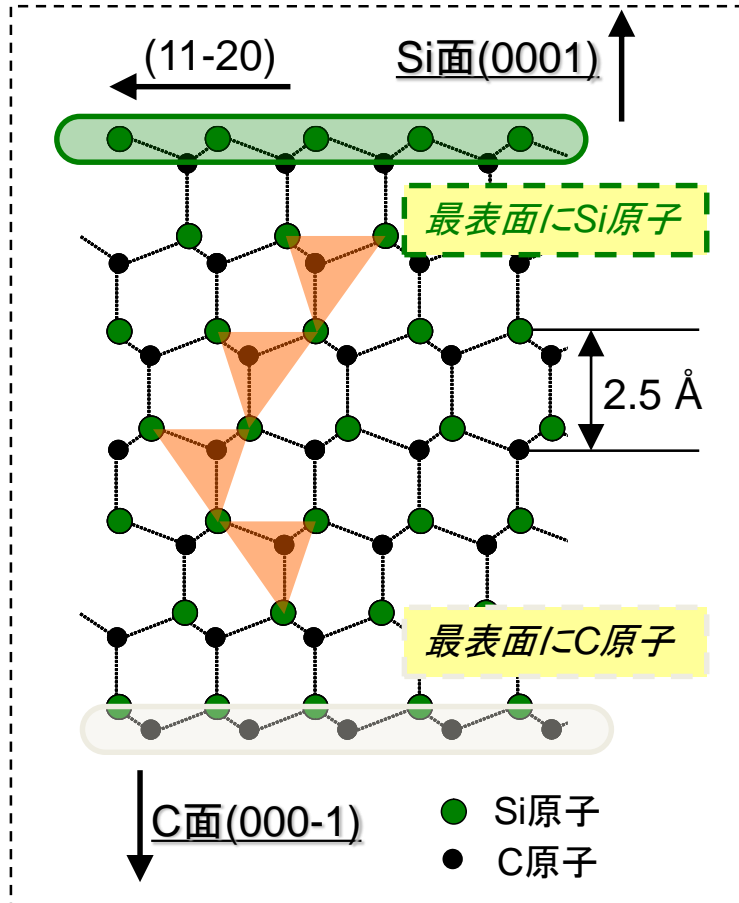
### ■ GaN-MOSデバイス開発

- AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
- GaN表面の熱酸化過程評価
- 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善

### ■ まとめ

# C面に形成したSiC-MOSFETの課題

## 4H-SiCの結晶構造

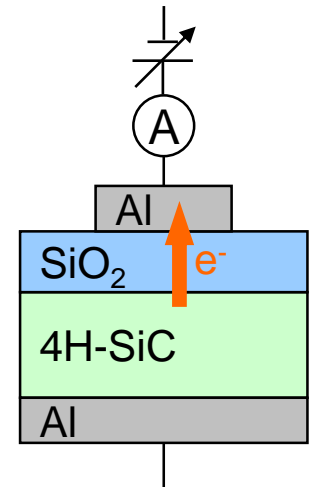
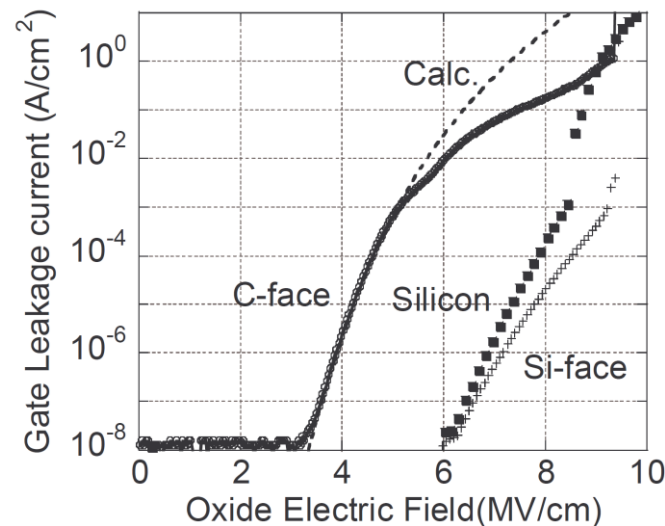


## C面上のSiC-MOSFET

⇒ 高チャネル移動度 ( $\sim 50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )

T. Kimoto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 44, 3 (2005).

## C面に形成したMOSキャパシタ



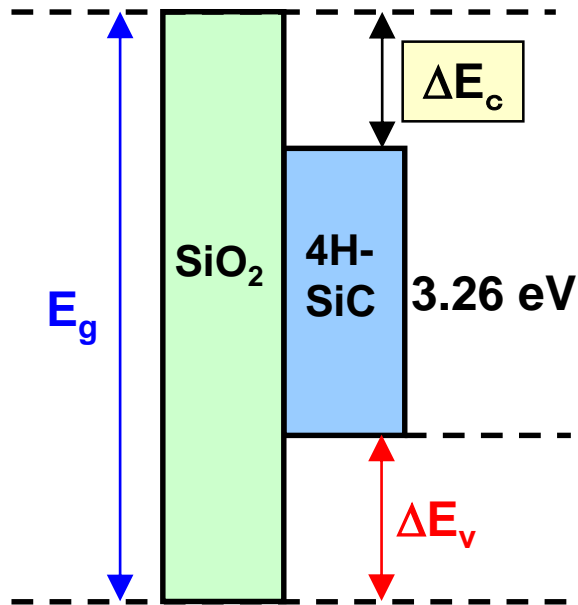
⇒ 酸化膜の信頼性劣化が顕著

T. Hatakeyama *et al.*, Mat. Sci. Forum 600-603, 783 (2009).

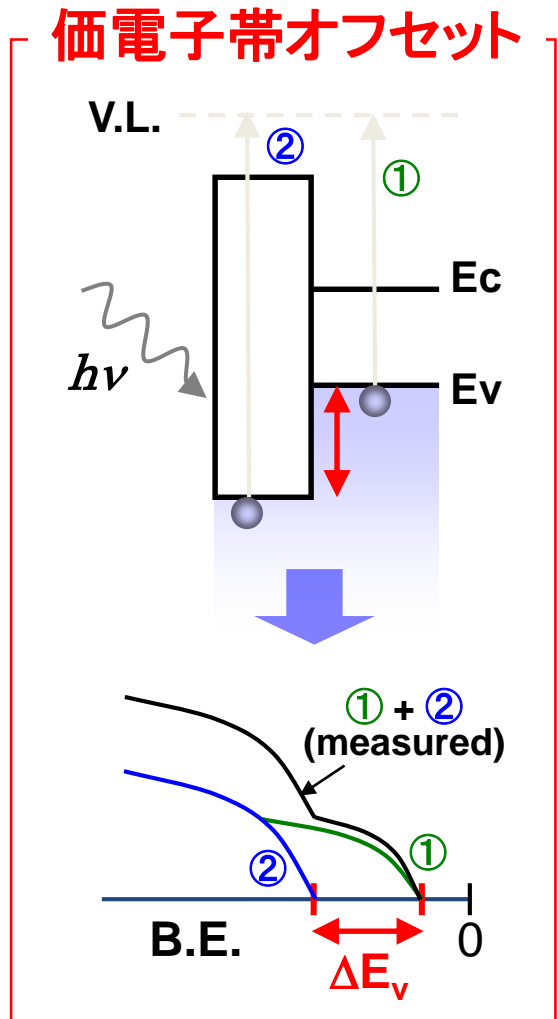
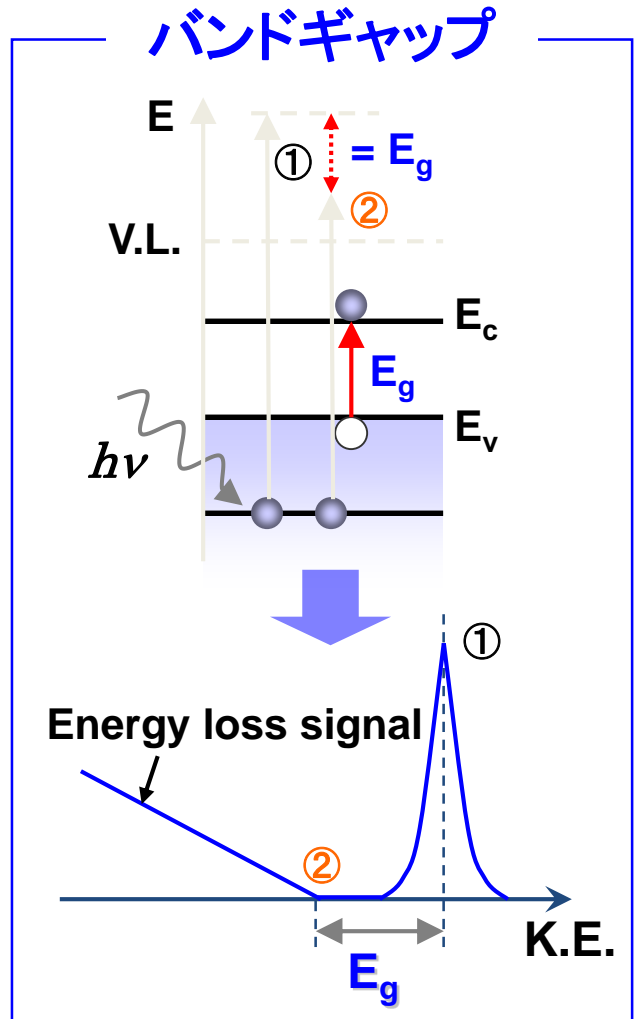
C面に形成した $\text{SiO}_2$ 絶縁膜の信頼性劣化要因の解明が必要

# エネルギーバンド構造評価手法

SiO<sub>2</sub>/SiC界面の伝導帯オフセット評価 ← 放射光XPS利用



$$\Delta E_c = E_g - \Delta E_v - 3.26 \text{ eV}$$

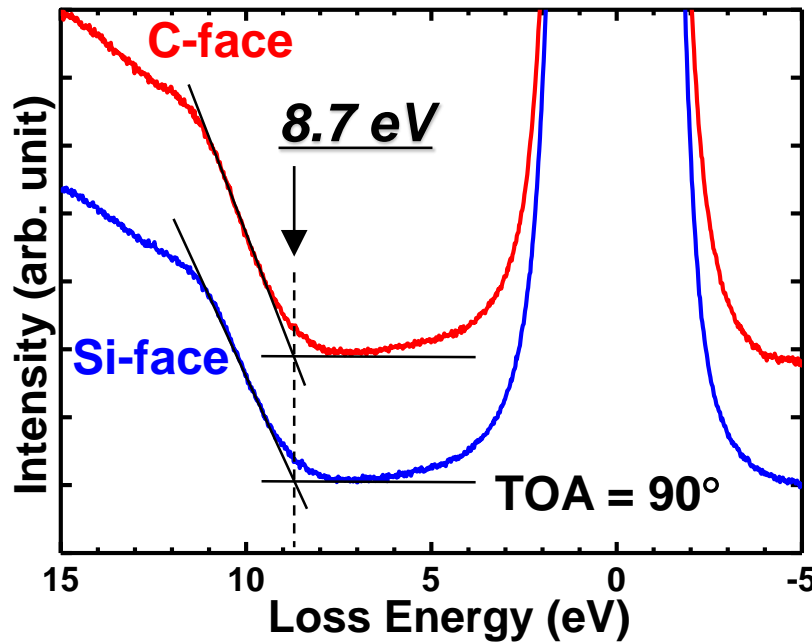


# SiO<sub>2</sub>/SiC界面のエネルギーバンド構造評価

SiO<sub>2</sub>(3nm)/4H-SiC

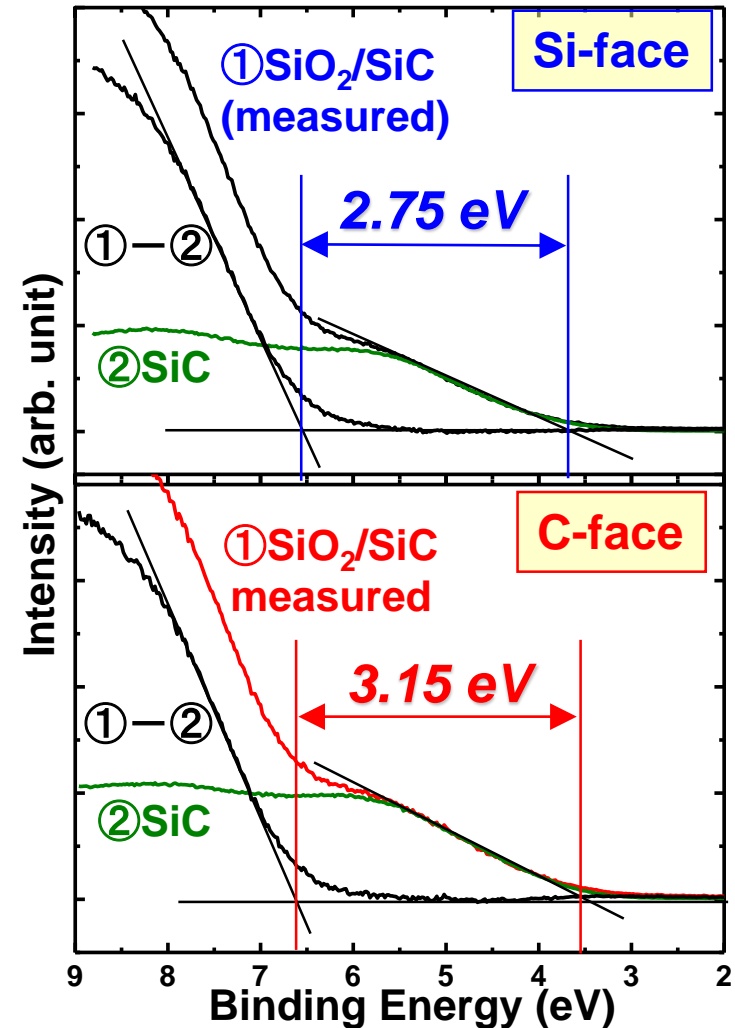
H. Watanabe et al., Mater. Sci. Forum 679-680, 386 (2011).

O 1sエネルギー損失スペクトル



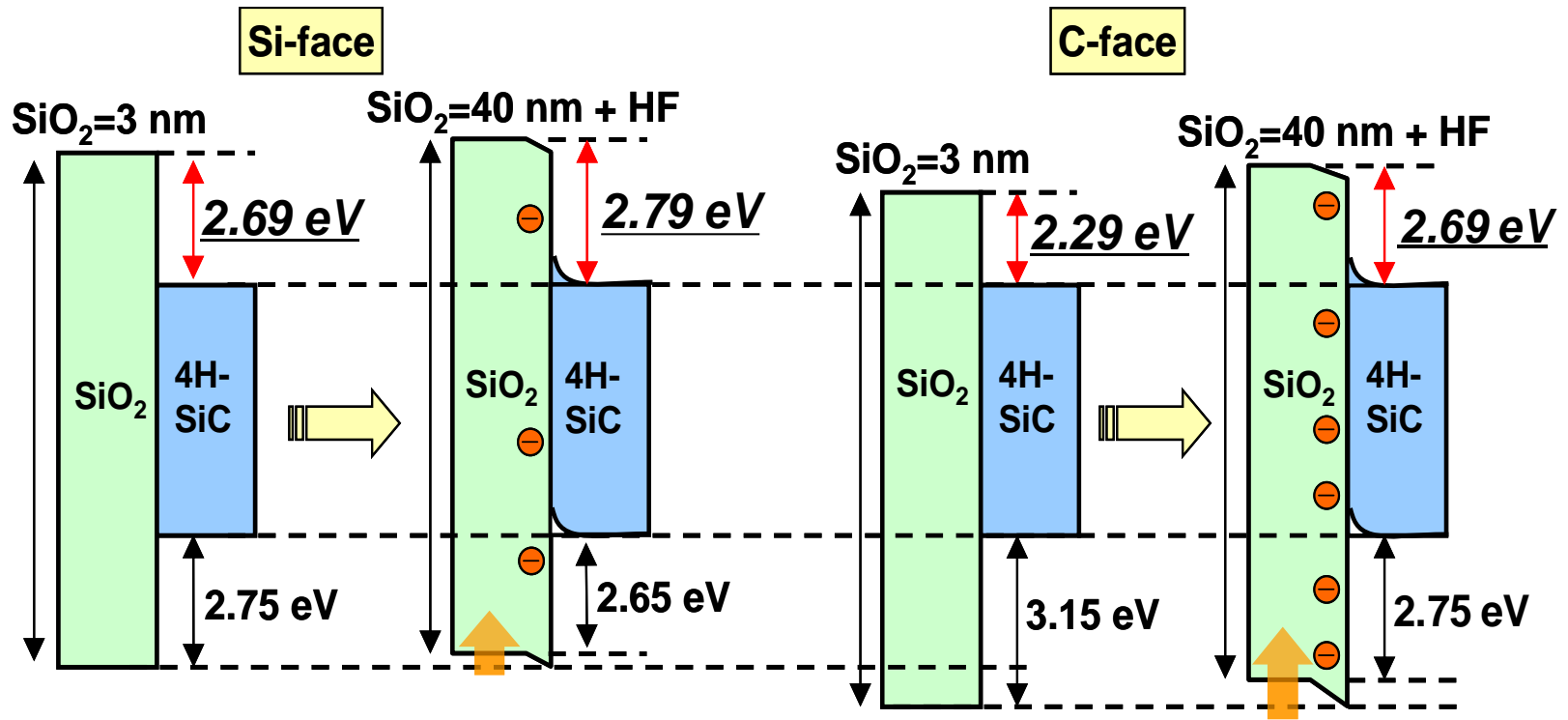
- ◆ 文献値 (8.9 ~ 9.0 eV) とほぼ一致  
⇒ Si面とC面で違いはない
- ◆  $\Delta E_C$  (Si面: 2.69 eV、C面: 2.29 eV)  
⇒ C面の方が $\Delta E_C$ が0.4 eV小さい

価電子帯スペクトル



# 4H-SiC(0001)<sub>Si</sub>及び(000-1)<sub>C</sub>面のバンド構造

H. Watanabe et al., Mater. Sci. Forum 679-680, 386 (2011).



- ・ C面はSi面と比較して本質的に伝導帯オフセットが小さい
- ・ 酸化膜厚増加と共に界面近傍に負の固定電荷が蓄積し、バンドオフセットが変調される(C面で顕著)
  - ← 界面特性向上とMOSFET閾値低下のトレードオフ



# 概要

## ■ ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス

### ■ SiCパワーデバイス開発

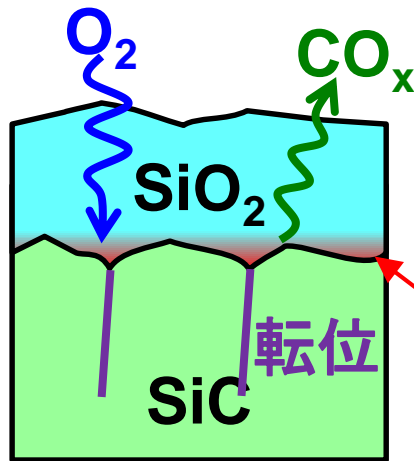
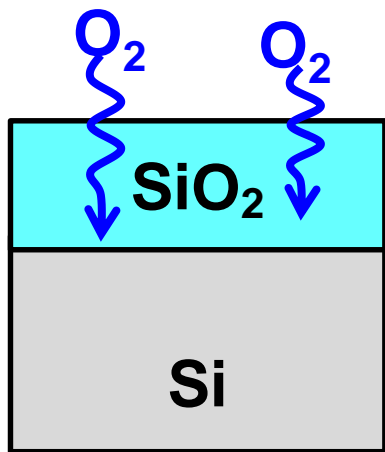
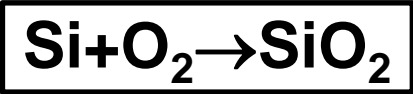
- 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
- SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造
- 窒化界面の評価と今後の課題

### ■ GaN-MOSデバイス開発

- AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
- GaN表面の熱酸化過程評価
- 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善

### ■ まとめ

# 熱酸化SiO<sub>2</sub>/SiC界面特性改善技術



ラフネス・結晶欠陥  
起因の膜厚不均一

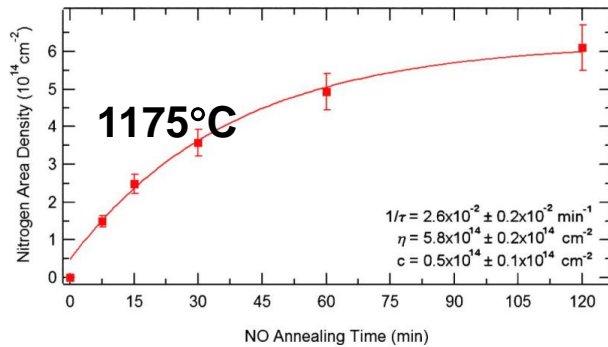
多量の界面欠陥  
(界面準位, 固定電荷)

	Si	SiC
酸化温度	800–1000	1000–1400
界面欠陥	Siダングリングボンド	C-C結合, 格子間炭素, Si-Si結合, etc
界面欠陥終端化 アニール処理	H <sub>2</sub> (~500°C)	NO, N <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , POCl <sub>3</sub> , etc (>1000°C)

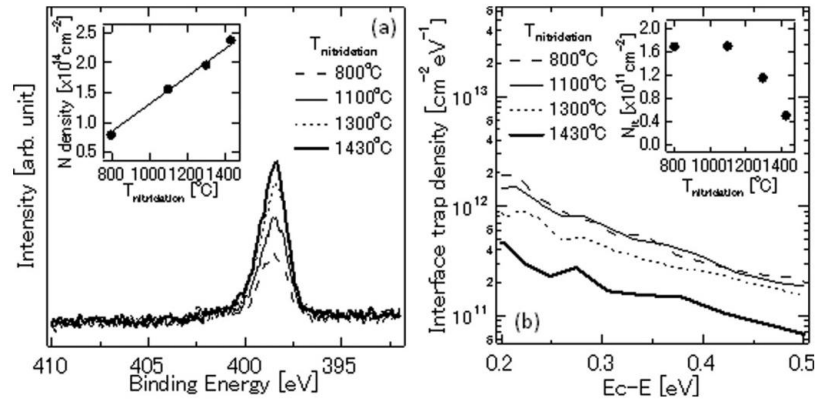
# SiO<sub>2</sub>/SiC界面のNO窒化に関する報告

## ➤ SiO<sub>2</sub>/SiC界面の窒素量はアニール時間と温度に依存

J. Rozen *et al.*,  
J. Appl. Phys. **105**, 124506 (2009).

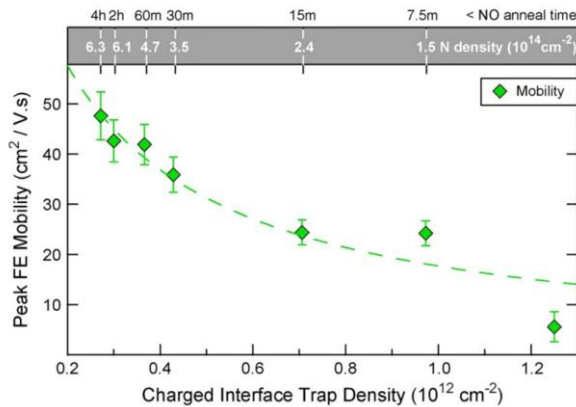


R. Kosugi *et al.*,  
Appl. Phys. Lett. **99**, 182111 (2011).

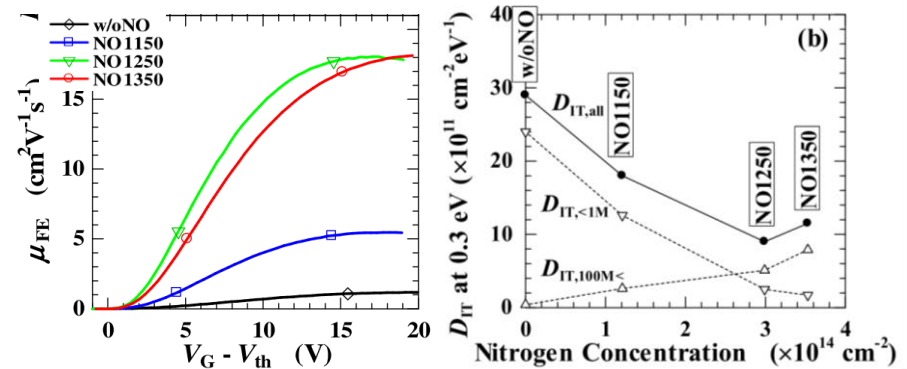


## ➤ 界面窒素量の増加に対して、移動度の向上は飽和傾向

J. Rozen *et al.*,  
IEEE Trans Electron Dev. **58**, 3808 (2011).



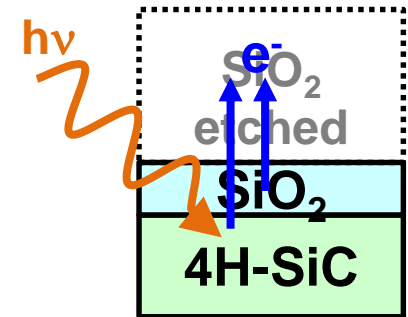
H. Yoshioka *et al.*,  
Mat. Sci. Forum **778-780**, 418 (2014).  
J. Appl. Phys. **112**, 024520 (2012).



# 窒素導入量と界面特性

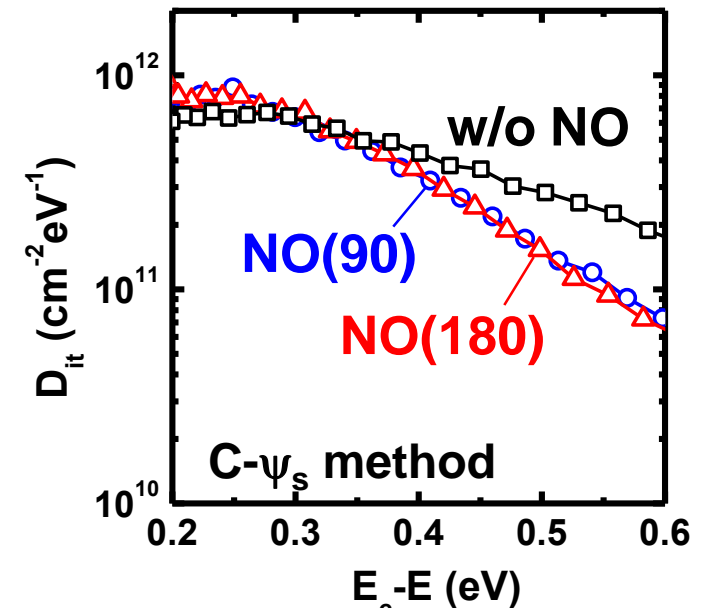
T. Hosoi et al., ECSCRM2014.

- 4H-SiC(0001) w/ n-epilayer ( $N_D=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )
  - Ion implantation & activation for MOSFET
  - Thermal oxidation in dry  $O_2$  (1300°C, 60 min)  $\sim 75 \text{ nm}$
  - **NO annealing (1250°C, 90 or 180 min)**
  - $N_2$  annealing (1250°C, 60 min)
- 
- Gate & contact formation
  - Etch back by diluted HF ( $\sim 3 \text{ nm}$ )
  - Electrical measurement
  - SR-XPS @SPring-8( $h\nu=686.5 \text{ eV}$ , TOA=90°)



Sample	Peak $\mu_{FE}$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	CET (nm)	$V_{FB}$ (V)
w/o NO	5-8	76.5	0.81
<b>NO(90)</b>	<b>36-38</b>	74.9	0.08
<b>NO(180)</b>	<b>30-34</b>	74.9	-0.06

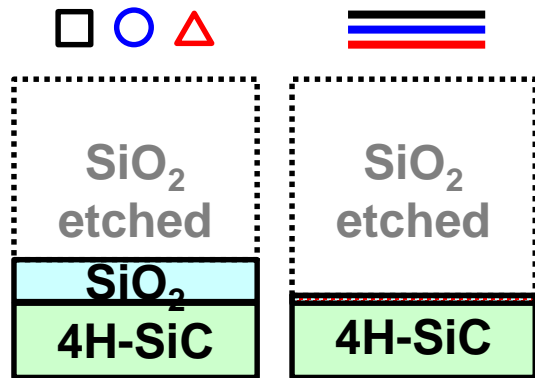
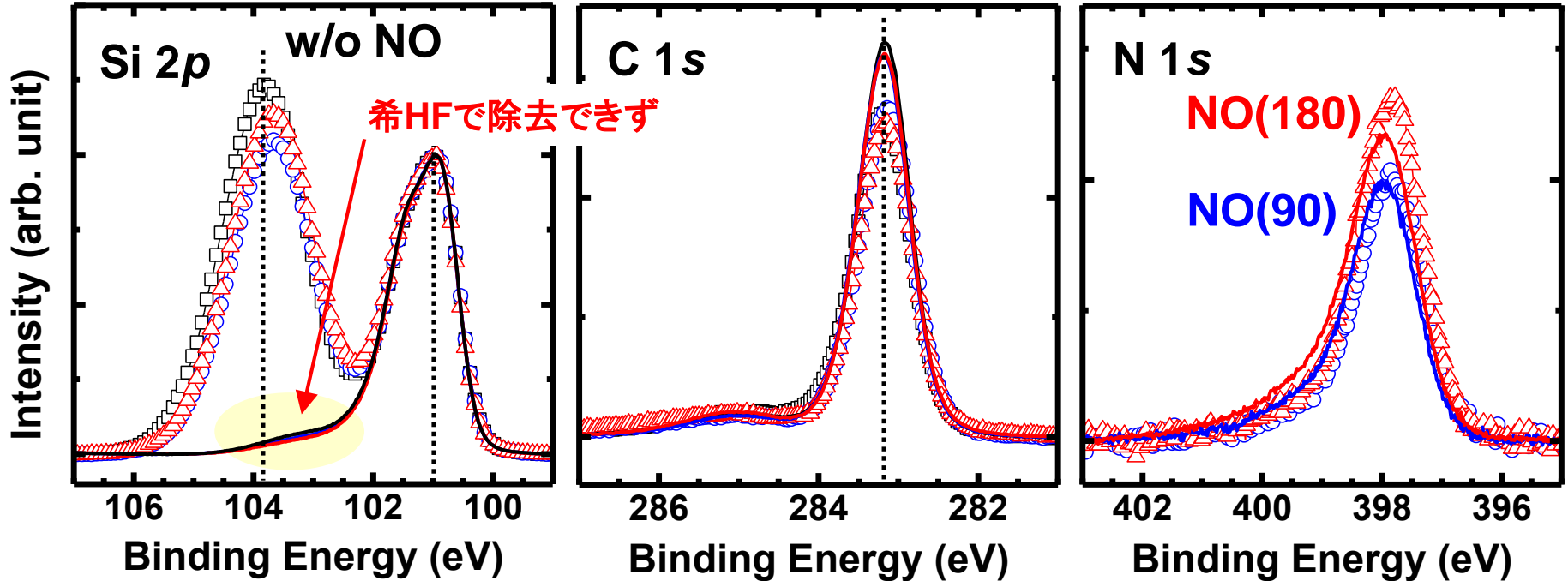
**過剰な窒化は移動度を劣化**



# SiO<sub>2</sub>/SiC窒化界面の評価

T. Hosoi et al., ECSCRM2014.

※SiC基板信号で結合エネルギーと強度を規格化

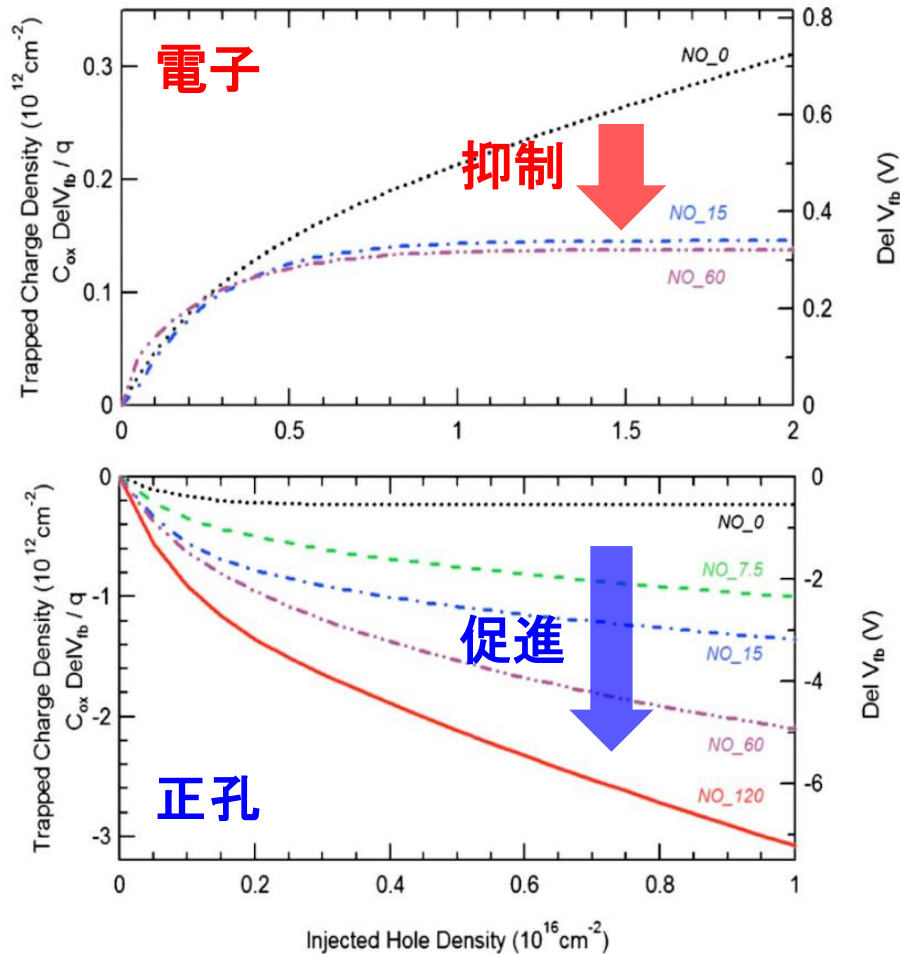


- NOアニールによりSiO<sub>2</sub>ピークは低BE側にシフト
- N量(N 1s信号強度)はNOアニール時間に依存  
(スペクトル形状(=結合状態)に変化なし)
- Nの大部分が希HFで除去できない界面層  
(or 基板)中に存在

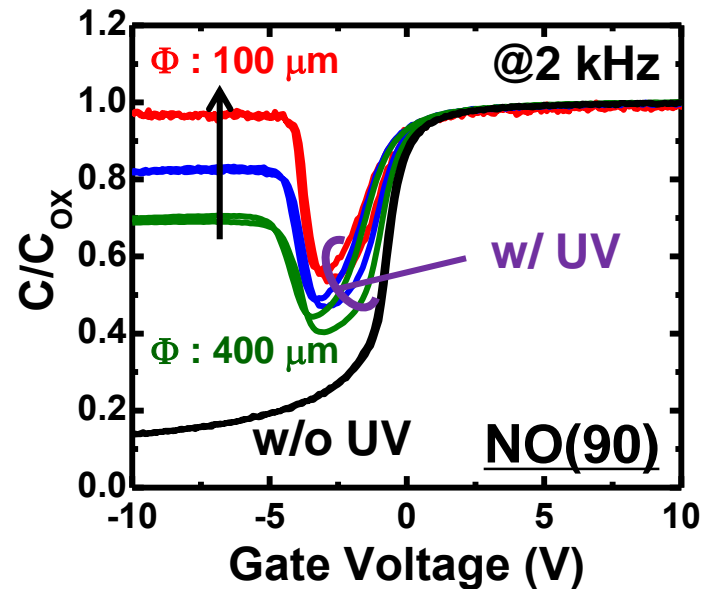
# NOアニール処理と正孔トラップ挙動

## ➤ 酸化膜中のキャリア捕獲挙動に対するNOアニールの影響

J. Rozen *et al.*, J. Appl. Phys. 105, 124506 (2009).



- n型4H-SiC(0001)
- ドライO<sub>2</sub>酸化 (1300°C, 75 nm)
- NOアニール (1250°C, 90 or 180分)
- Al電極蒸着 ( $\Phi$ : 100, 200, 400  $\mu\text{m}$ )

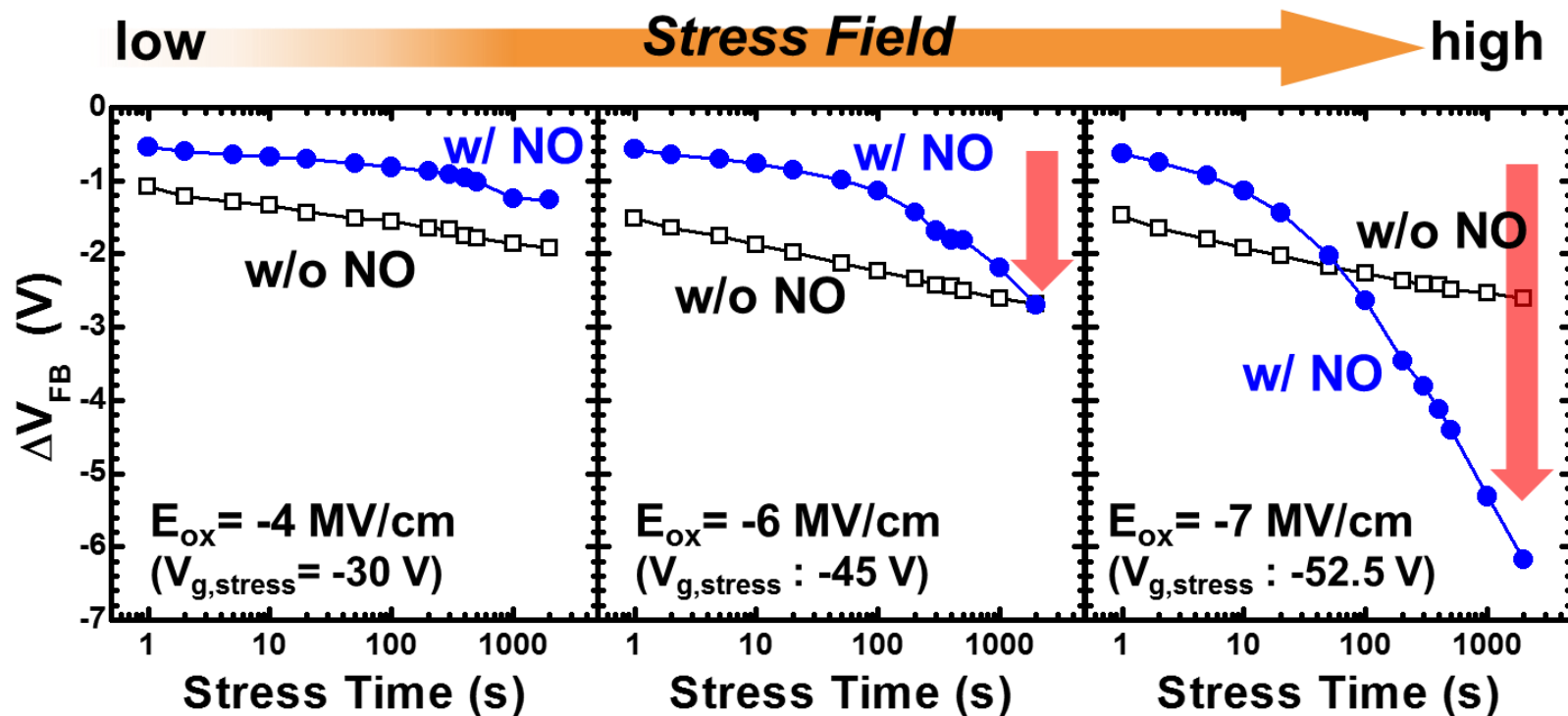


# SiO<sub>2</sub>/Si界面窒化による正孔トラップ促進

## Post-oxidation annealing (POA) in NO (or N<sub>2</sub>O)

- ⊗ チャンネル移動度向上に限界 **30–40 cm<sup>2</sup>/Vs**
- ⊗ **正孔トラップの増加** ⇒ V<sub>th</sub> instability

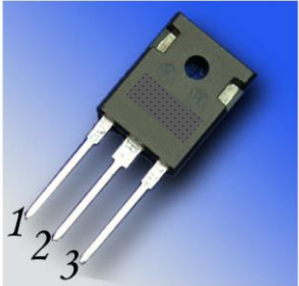
Y. Katsu *et al.*, Mat. Sci. Forum 858, 599 (2016).



# 市販SiC MOSFET

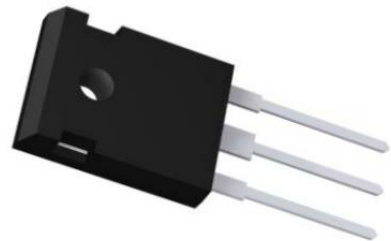
## Company A (Oct. 2015)

Maximum Ratings ( $T_c = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified)



Symbol	Parameter	Value	Unit	Test Conditions
$V_{DSmax}$	Drain - Source Voltage	1700	V	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_b = 100\ \mu\text{A}$
$V_{GSmax}$	Gate - Source Voltage	-10/+25	V	Absolute maximum values
$V_{GSop}$	Gate - Source Voltage	-5/+20	V	Recommended operational values
$I_D$	Continuous Drain Current	5.0	A	$V_{GS} = 20\text{ V}, T_c = 25^\circ\text{C}$
		3.5		$V_{GS} = 20\text{ V}, T_c = 100^\circ\text{C}$

## Company B (Nov. 2015)



●Absolute maximum ratings ( $T_a = 25^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Value	Unit
Drain - Source voltage	$V_{DSS}$	1200	V
Continuous drain current	$T_c = 25^\circ\text{C}$	$I_D^{*1}$	40
	$T_c = 100^\circ\text{C}$	$I_D^{*1}$	28
Pulsed drain current	$I_{D,pulse}^{*2}$	80	A
Gate - Source voltage (DC)	$V_{GSS}$	-6 to 22	V
Gate - Source surge voltage ( $T_{surge} < 300\text{nsec}$ )	$V_{GSS-surge}^{*3}$	-10 to 26	V

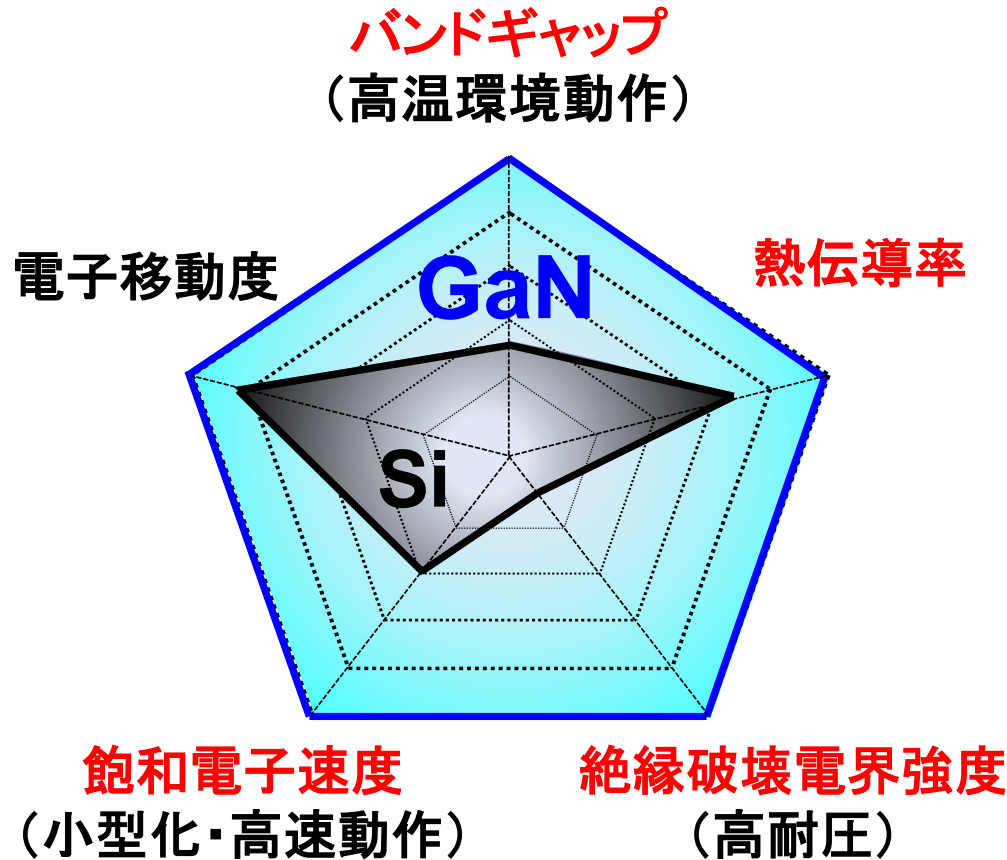


# 概要

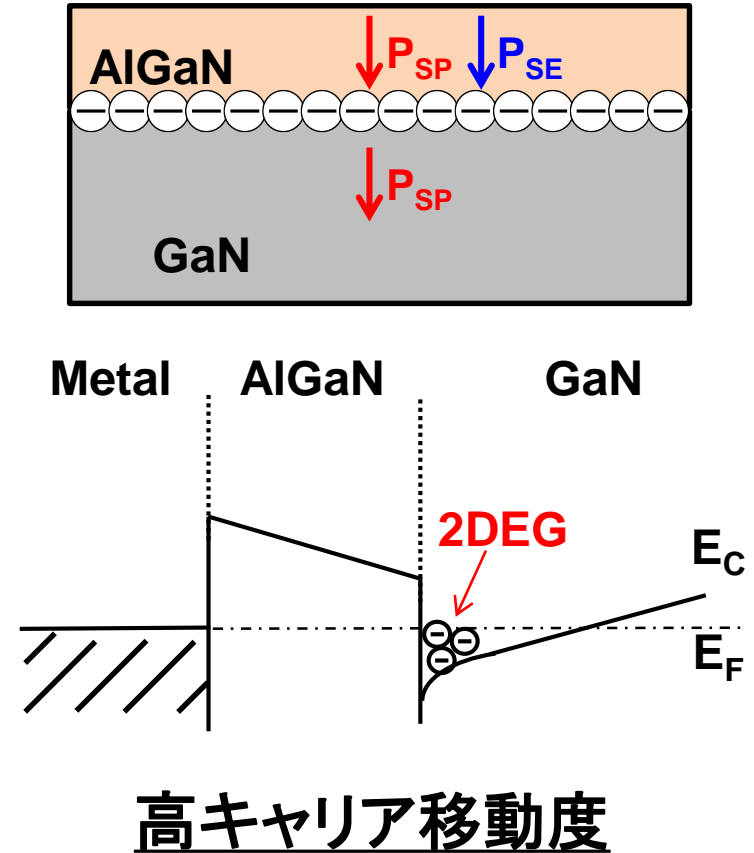
- ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス
- SiCパワーデバイス開発
  - 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
  - SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造
  - 窒化界面の評価と今後の課題
- GaN-MOSデバイス開発
  - AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
  - GaN表面の熱酸化過程評価
  - 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善
- まとめ

# GaNパワーデバイスの優位性

## Si, GaNの物性値比較



## 二次元電子ガスの利用

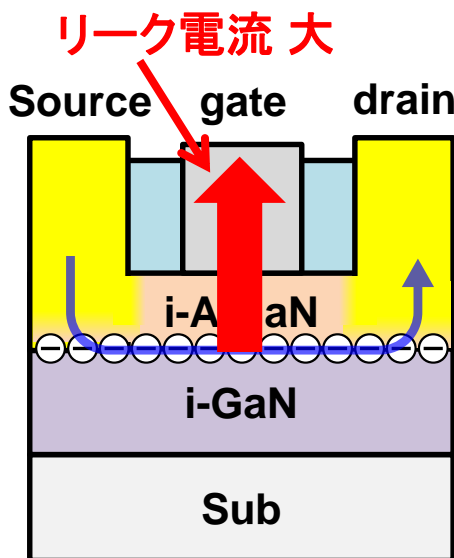


## GaN: 高周波・高出力パワーデバイスの実現

# AlGaN/GaN MOS-HFETの検討

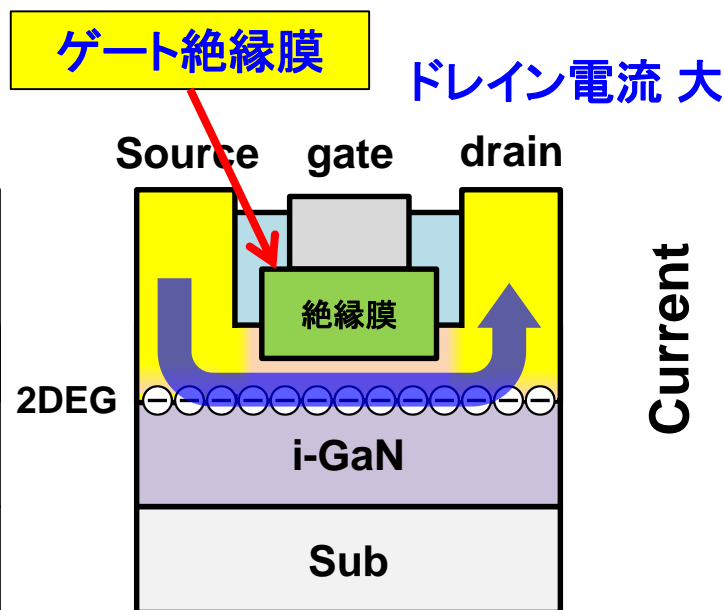
## AlGaN/GaN HEMT: 高周波スイッチング素子 携帯電話基地局の送信用増幅器

### ショットキーゲート型 HFET



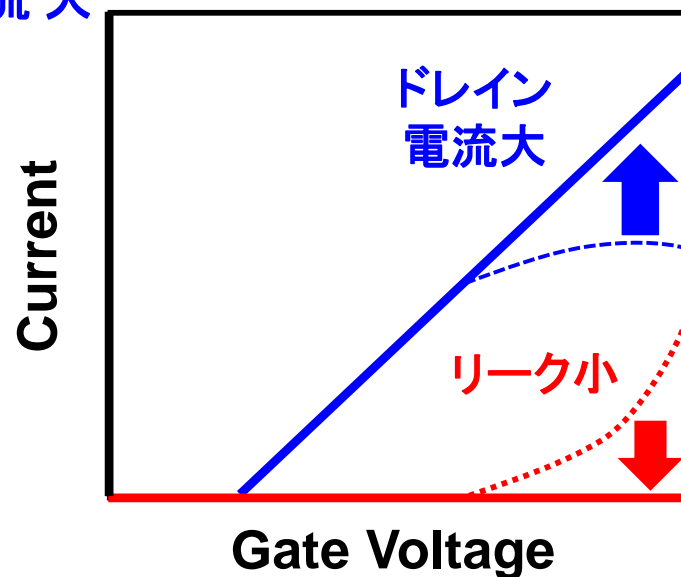
ドレイン電流 小

### MOS型HFET



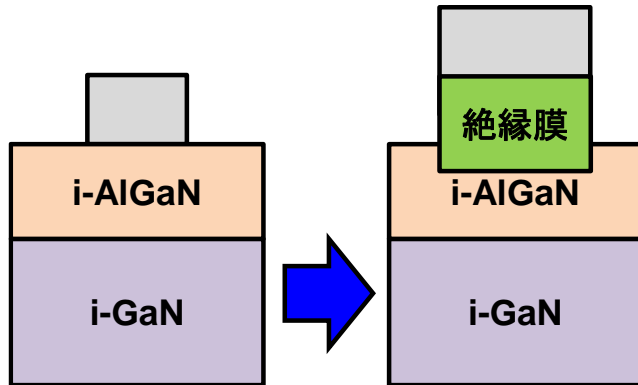
ドレイン電流 大

### I-V特性



ノーマリーオフ&リーク電流小(大電力化)

# MOS-HFET用堆積ゲート絶縁膜



## MOS-HFETの実現

- ✓ ゲート絶縁膜の膜質
  - ✓ 絶縁膜/AlGaN界面の品質
- デバイス特性を決定  
(閾値電圧変動、駆動力)

SiC-MOS: 高温熱酸化SiO<sub>2</sub>

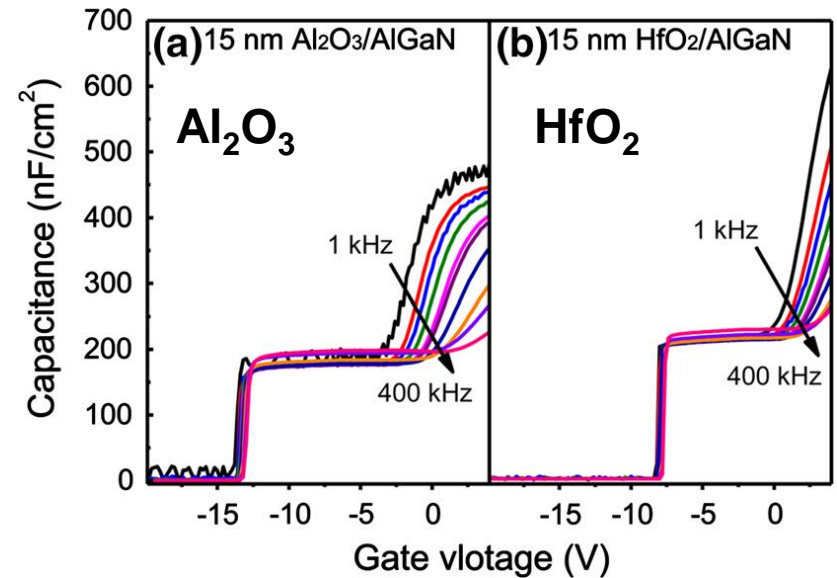


GaN MOSデバイス: 堆積絶縁膜

- ✓ HfO<sub>2</sub> (ハフニア)
- ✓ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (アルミナ)

× 界面特性 × 絶縁膜膜質

X. Qin *et al.*, J Mater. Sci: Mater Electron **26**, 4638 (2015).



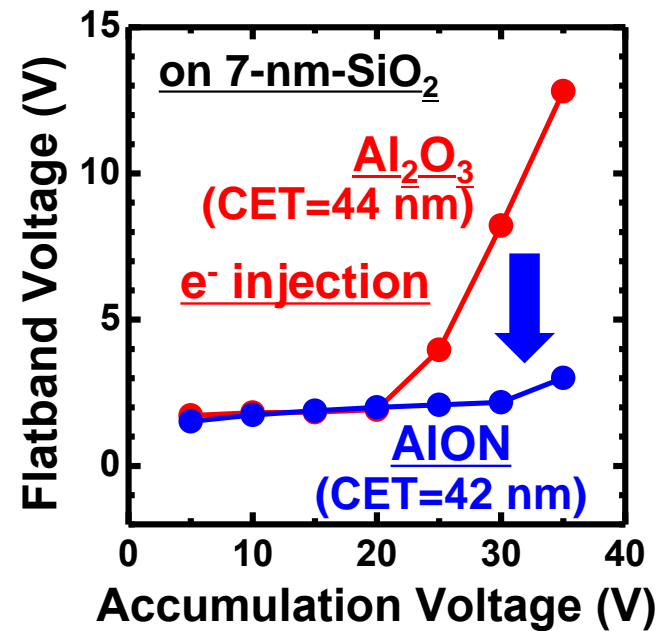
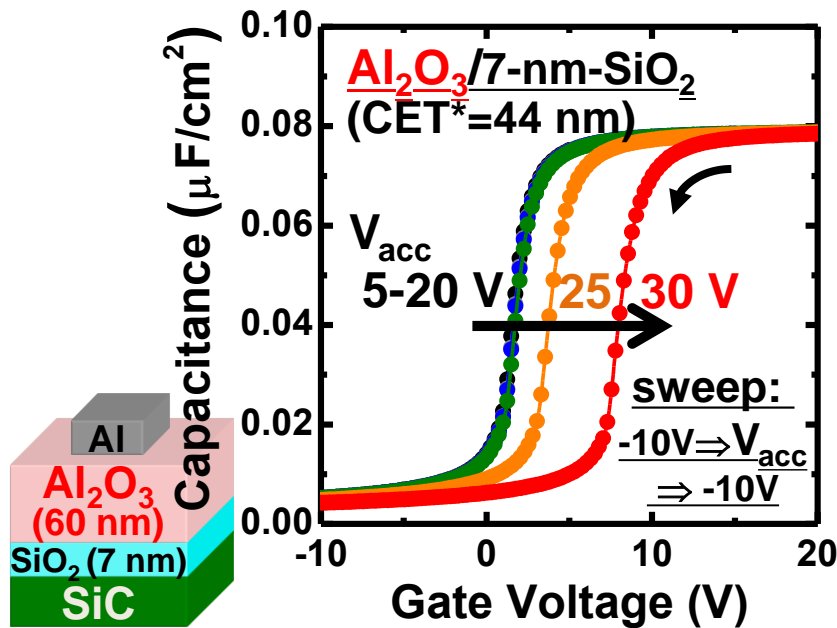
絶縁膜界面特性及び膜質の向上が急務

# AIONゲート絶縁膜 (SiC-MOS)

T. Hosoi *et al.*, IEDM (2012) 7.4.

■ パワーデバイス用絶縁膜としてはALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 応用が中心

$\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜への電子注入 ⇒ 窒素添加による信頼性向上



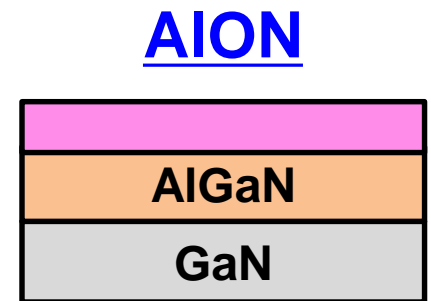
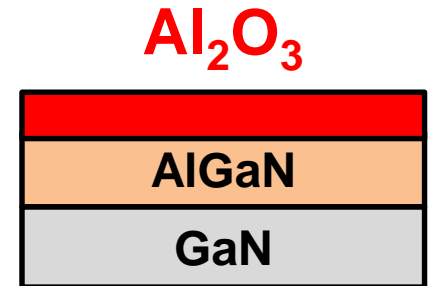
GaN-MOSへのAION応用 ・ 閾値電圧安定性向上

・ 界面特性改善 (AION/AlGaNの相性)

# 放射光XPSによる絶縁膜界面構造評価

@ SPring-8 BL23SU

- AlGaN/GaN on Si(111)基板
- HCl洗浄(5%)
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  or  $\text{AlON}$ 成膜  
反応性スパッタリング (2 nm)  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$ : Ar/ $\text{O}_2$  混合ガス  
 $\text{AlON}$ :  $\text{N}_2/\text{O}_2$  混合ガス
- 熱処理 ( $\text{N}_2$ ,  $800^\circ\text{C}$ , 3 min: 膜質改善)
- 放射光XPS (TOA= $90^\circ$ ,  $h\nu=1253$  eV)



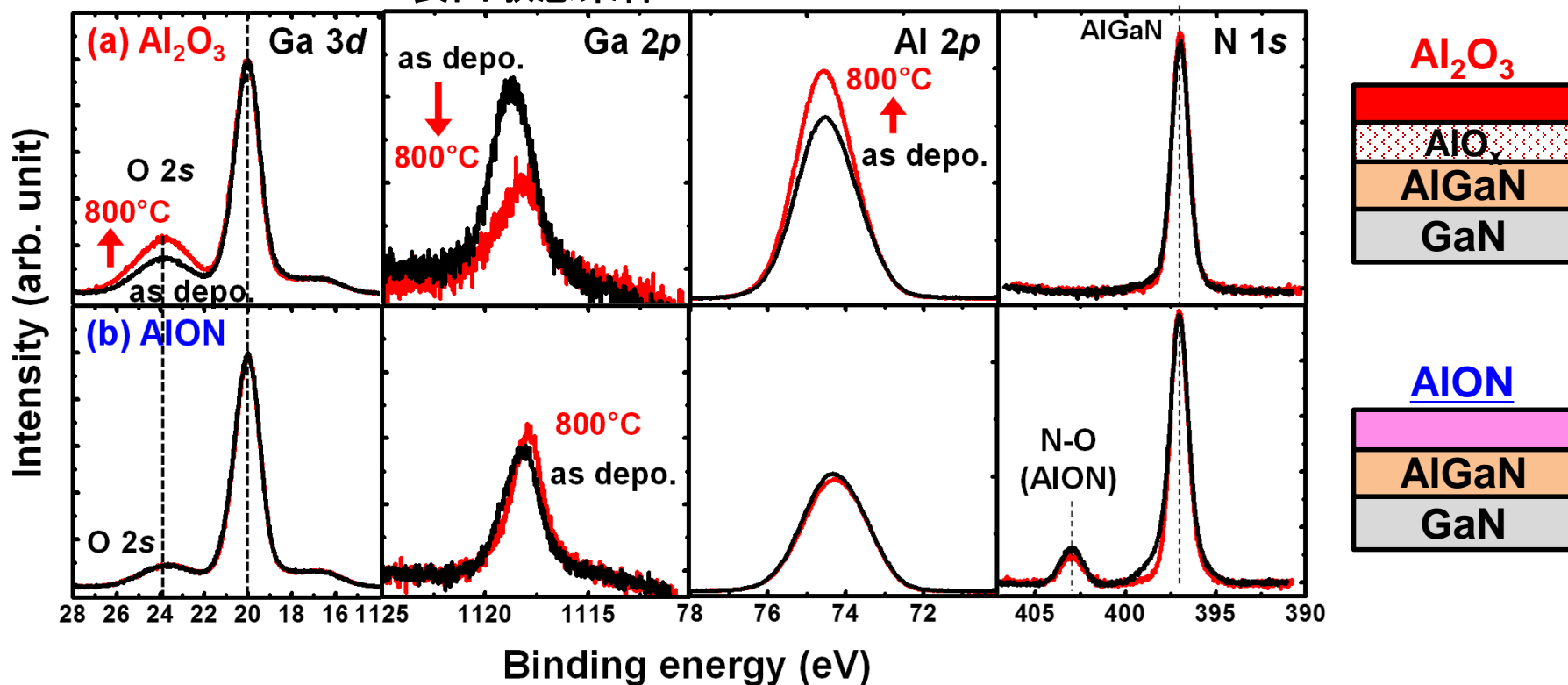
スペクトル変化から絶縁膜界面の熱安定性(反応層)を評価

# 放射光XPSによる絶縁膜反応解析

R. Asahara *et al.*, Appl. Phys. Express **9**, 101002 (2016).

表面敏感条件

※ AlGaN基板からのGa3d信号強度で規格化



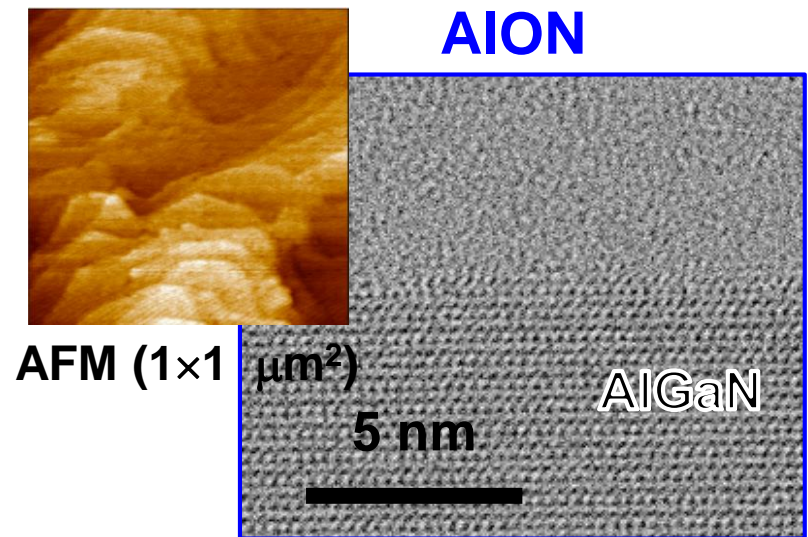
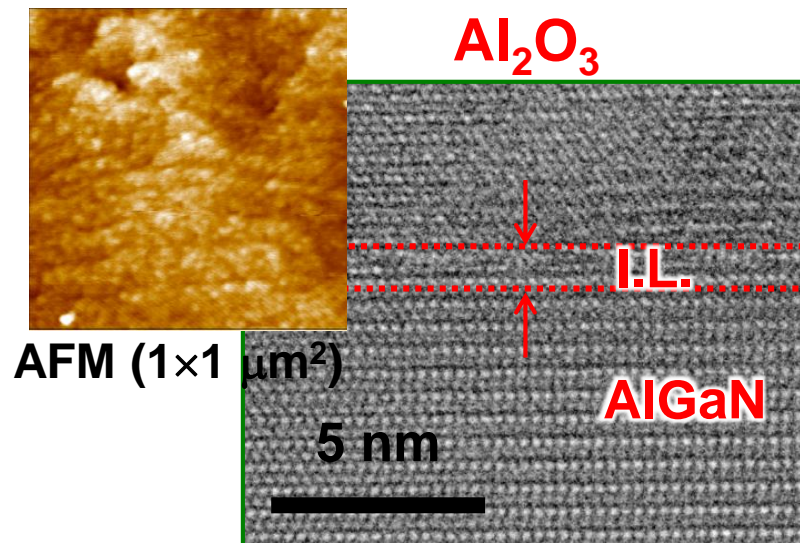
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaN}$ :  $\text{AlO}_x$ 界面反応層の成長を示唆

AION/AlGaN: 優れた界面安定性を確認

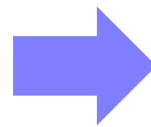
# 断面TEM及びAFM観察

R. Asahara *et al.*, Appl. Phys. Express 9, 101002 (2016).

熱処理後(窒素雰囲気, 800°C, 3分間)



- ・ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜の結晶化
- ・ 表面ラフネス発生
- ・ 界面反応層(AIO<sub>x</sub>)が形成



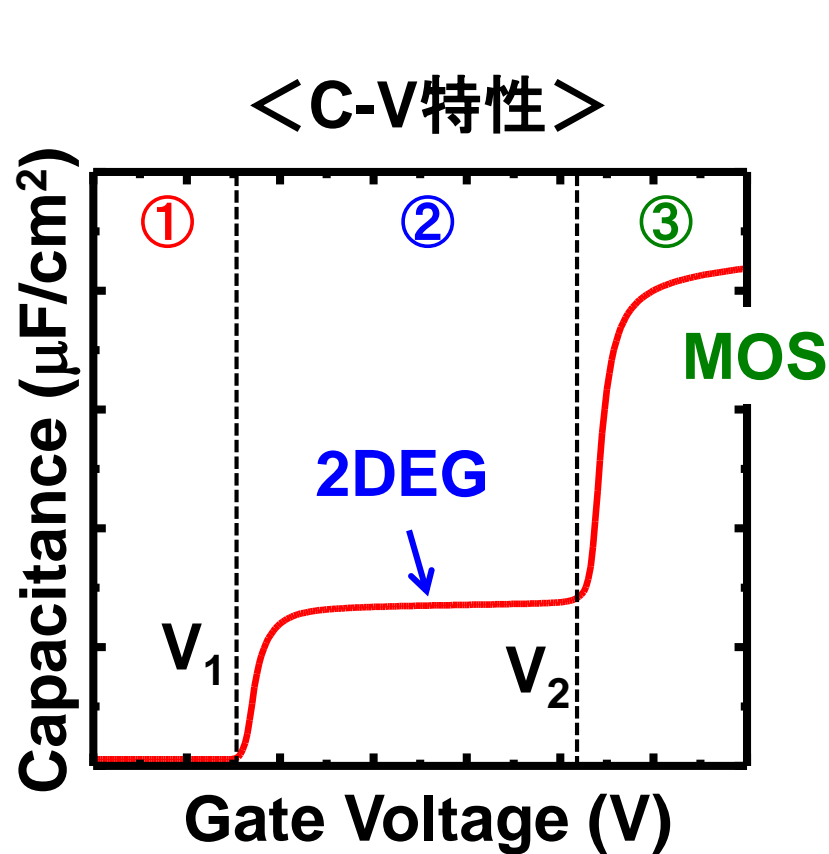
- ・ 非晶質AION膜
- ・ 平滑な表面形状を維持
- ・ 急峻なAION/AlGaN界面

■ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜の窒化(AION)による結晶化温度上昇

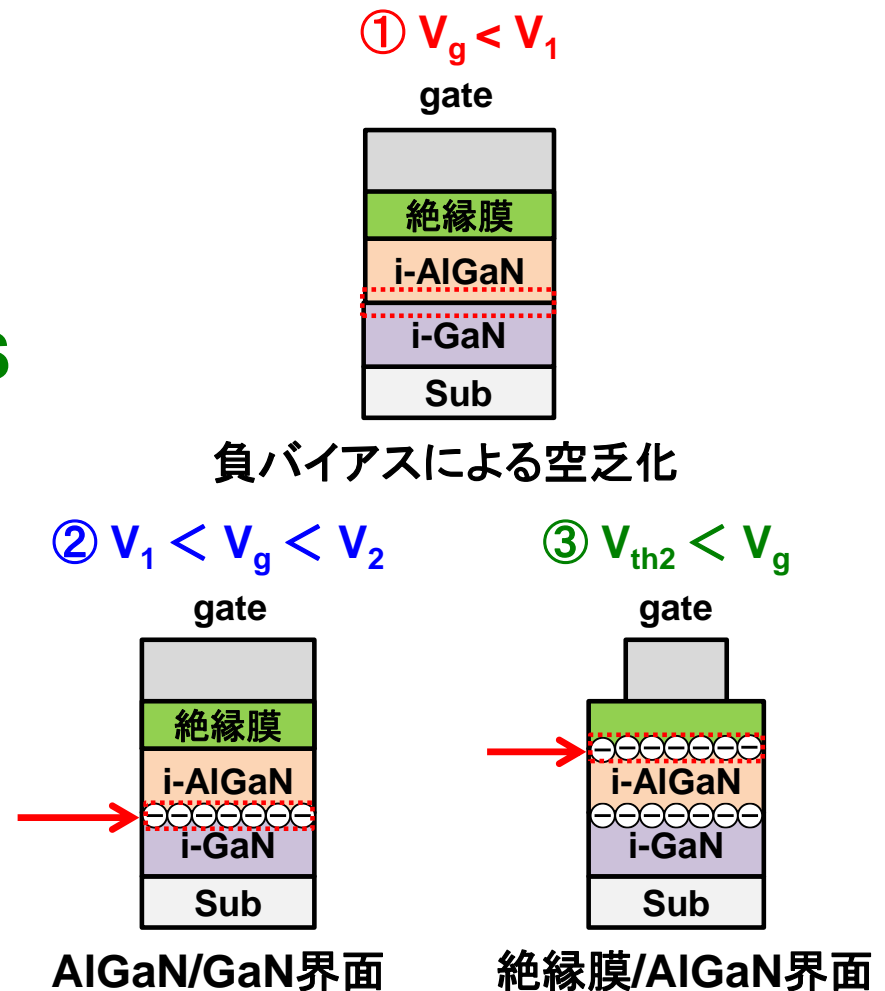
■ AlGaN表面への窒素プラズマ照射による安定化



# AlGaN/GaN MOSキャパシタの基本特性

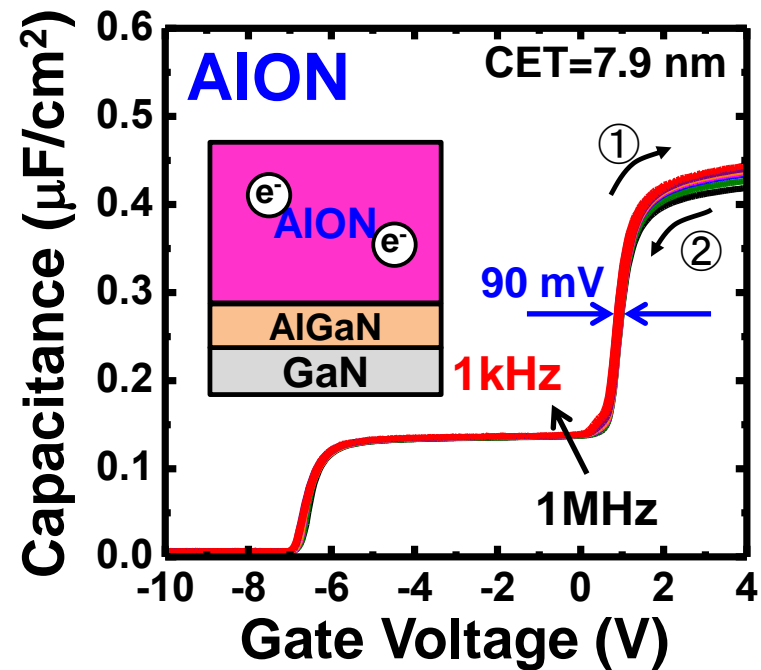
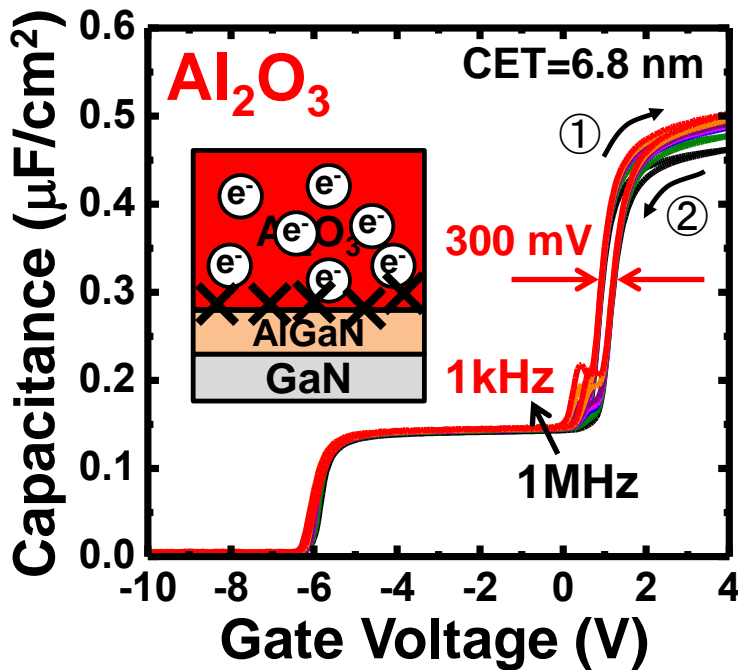


2段階のC-Vカーブ



# AlGaN/GaN MOSキャパシタのC-V特性

R. Asahara *et al.*, Appl. Phys. Express **9**, 101002 (2016).

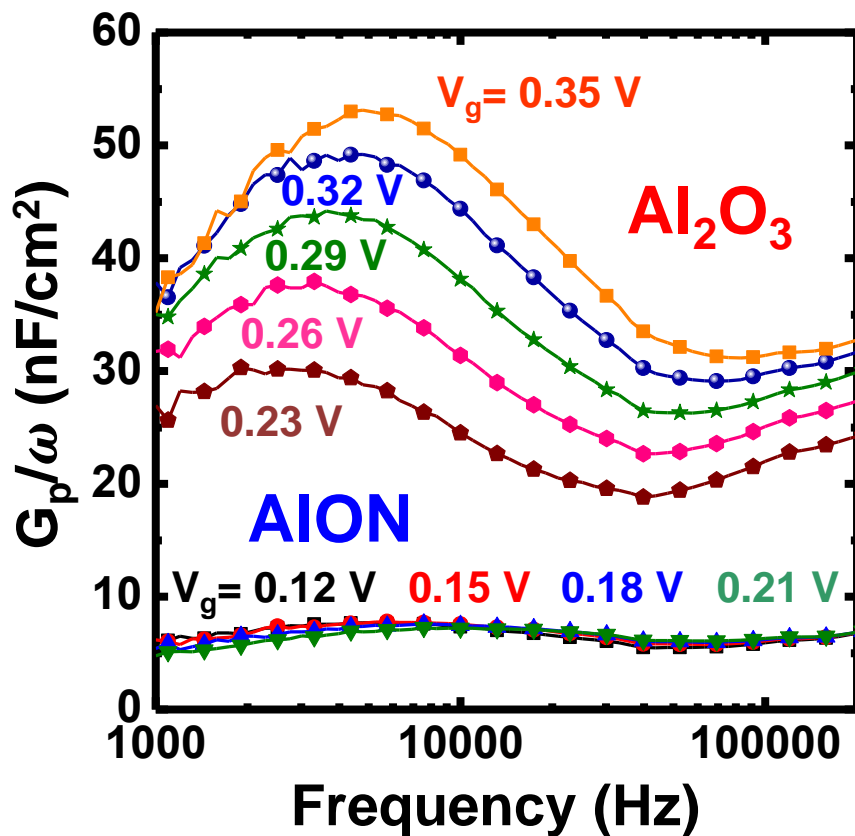


- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 絶縁膜でも典型的な2段階C-Vカーブを取得  
(ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜に対する優位性: 室温酸素ラジカル照射)
- AION絶縁膜によるヒステリシスと周波数分散の低減  
⇒ 電荷注入耐性と界面電気特性の向上  
(AION膜質 & 窒素/酸素プラズマ照射効果)

# 界面準位密度 ( $D_{it}$ ) 評価結果

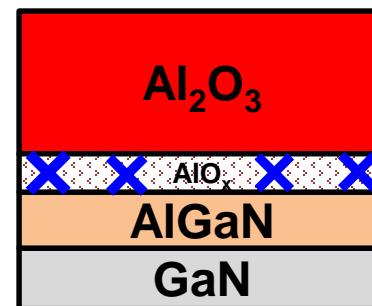
R. Asahara *et al.*, Appl. Phys. Express 9, 101002 (2016).

<コンダクタンス法>



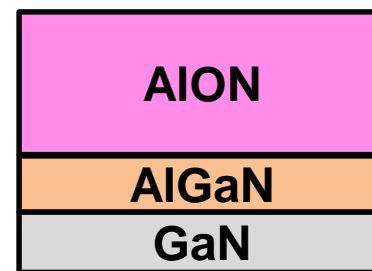
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaN

$$D_{it} = 4.8-7.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$$



AION/AlGaN

$$D_{it} = 1.2-1.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$$

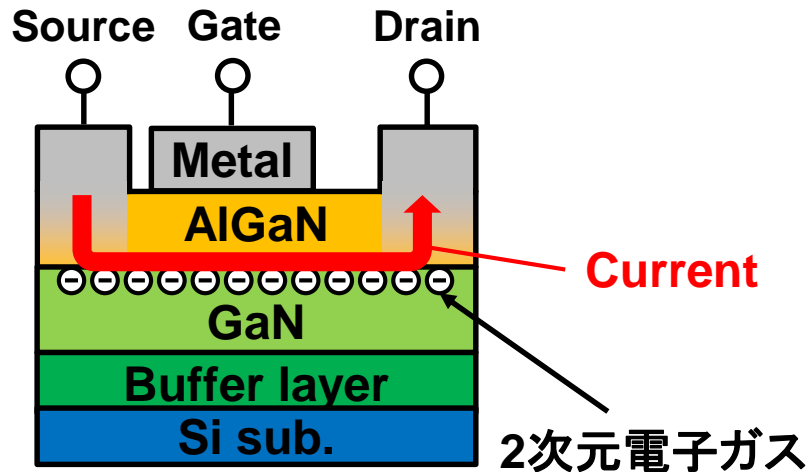


# 概要

- ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス
- SiCパワーデバイス開発
  - 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
  - SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造
  - 窒化界面の評価と今後の課題
- GaN-MOSデバイス開発
  - AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
  - GaN表面の熱酸化過程評価
  - 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善
- まとめ

# GaN縦型パワーデバイスの可能性

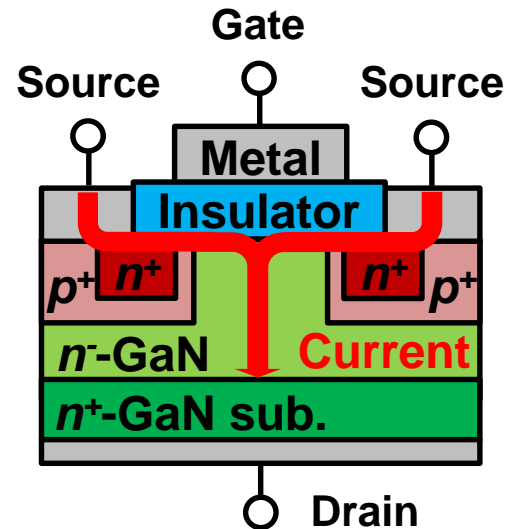
## <横型デバイス>



高移動度2次元電子ガス

高周波用デバイス

## <縦型デバイス>



高耐圧化/大電流動作

大電力用デバイス

### 課題

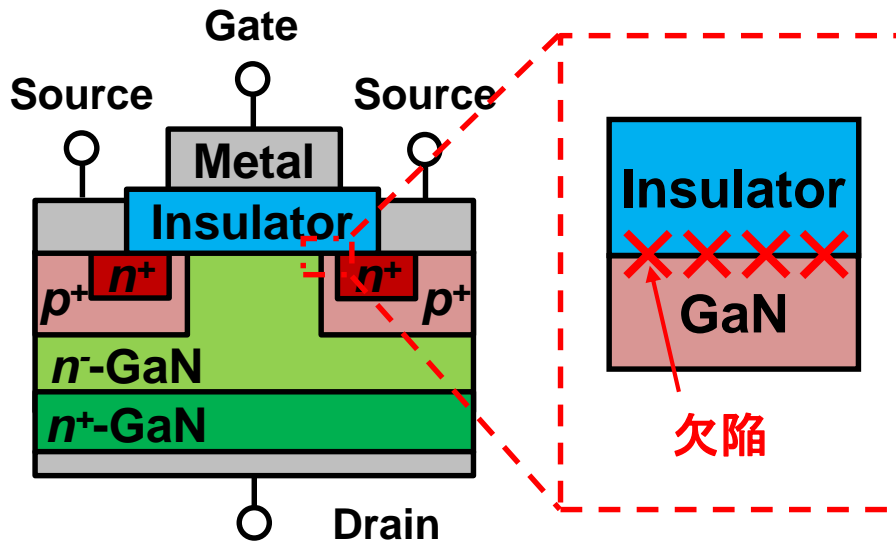
- ・GaN on GaN基板の高品質化
- ・GaN上MOS構造の作製技術

# GaN-MOSデバイスの技術課題

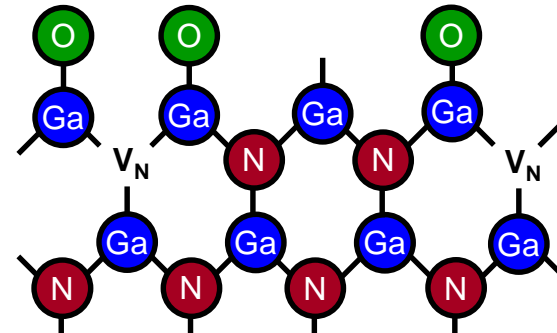
- ✓ GaN-MOSデバイス用堆積絶縁膜 (CVD-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> & ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## 絶縁膜/GaN界面の欠陥

- [1] R. Nakasaki *et al.*, IEC Technical Report 99, 19 (1999).
- [2] K. J. Chen *et al.*, Phys. Status Solidi A 212, 1059 (2015).
- [3] T. Hashizume *et al.*, Appl. Surf. Sci. 234, 387 (2004).



- ✓ 不均質な自然酸化膜 [1, 2]
- ✓ 表面近傍の窒素空孔 [2, 3]



多数の界面欠陥 ⇒ デバイス性能の低下

絶縁膜/GaN界面の欠陥低減が必要

# 熱酸化Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の問題点

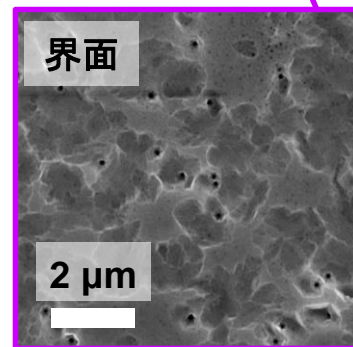
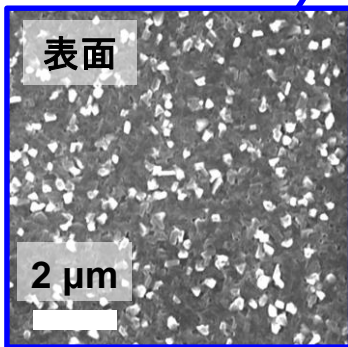
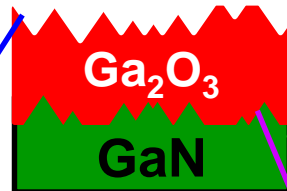
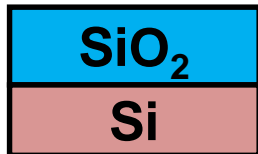
Si: 熱酸化SiO<sub>2</sub>を絶縁膜として良好なMOSFET動作

GaN: 熱酸化により酸化ガリウム(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)が形成

## 表面 & 界面形状

Y. Zhou et al., Solid-State Electron.  
52, 756 (2008).

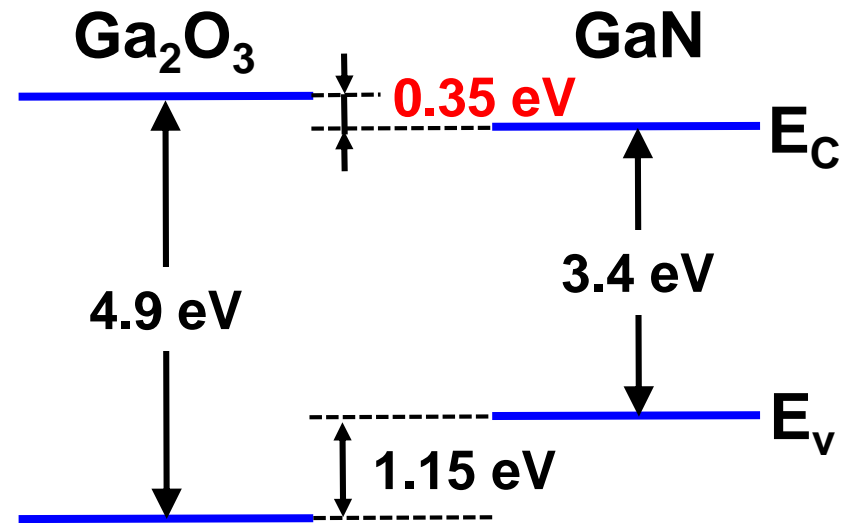
層状酸化



厚膜化 ⇒ ラフネスの増加

## Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaNバンド構造

M. Grodzicki et al., Appl. Surf. Sci.  
304, 20 (2014).



電子に対して低障壁 $\Delta E_C$   
⇒ リーク電流の増加

# GaN表面の熱酸化過程評価

- $n$ -GaN/Si (欠陥密度  $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ )
- 自立  $n$ -GaN (欠陥密度  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ )

- 塩酸洗浄 (5%, 10 min)

- 大気圧  $\text{O}_2$  ガス中で熱酸化 (700~1000°C, 30 min)

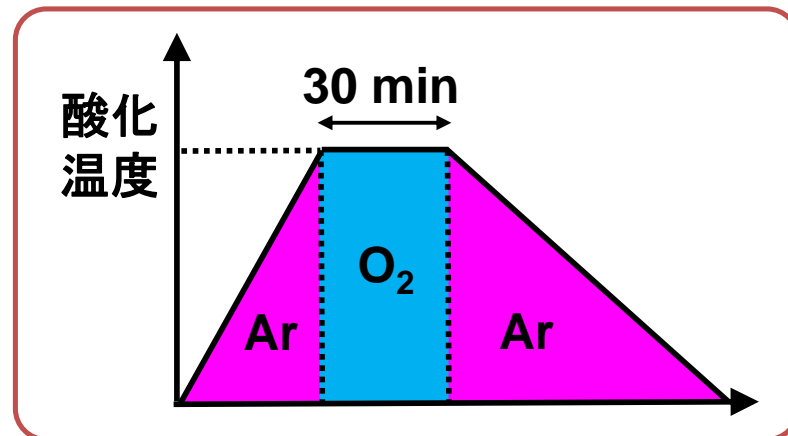
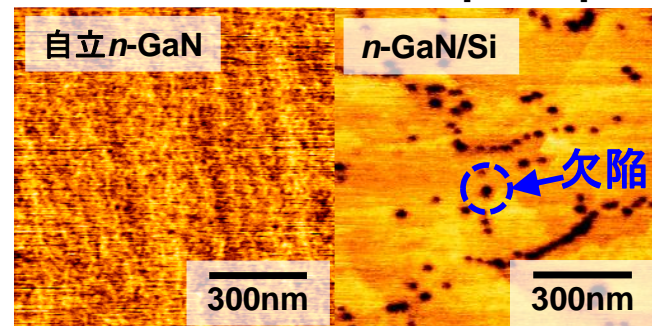
- 分析評価

XPS: 表面酸化過程

- ・ Al  $K_{\alpha}$ : 1487eV, TOA=90°
- ・ Ga  $2p_{3/2}$  スペクトルを解析

AFM: 表面形状

観察領域:  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$

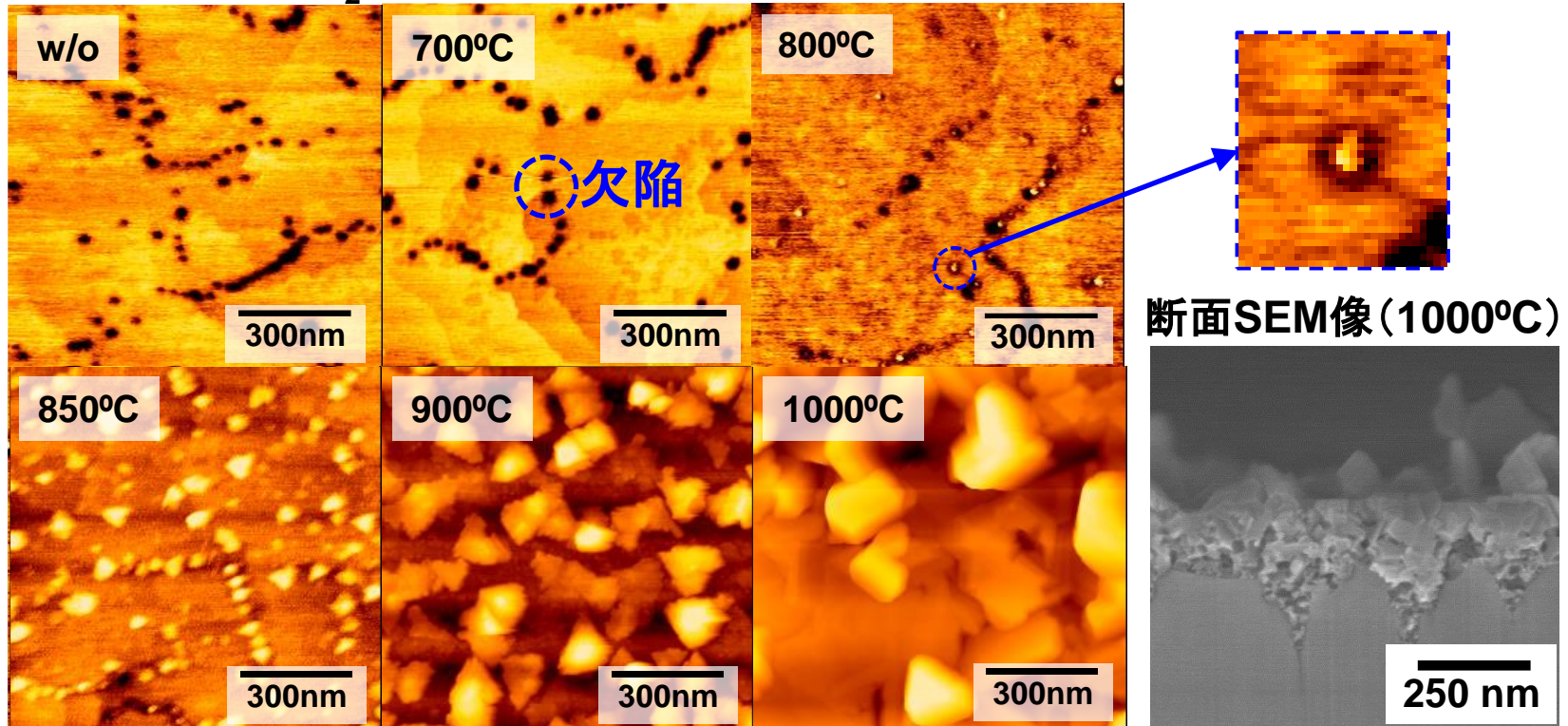




# GaN/Si基板表面の熱酸化過程

T. Yamada *et al.*, J. Appl. Phys. 121, 035303 (2017).

AFM像(大気圧O<sub>2</sub>ガス, 30 min)

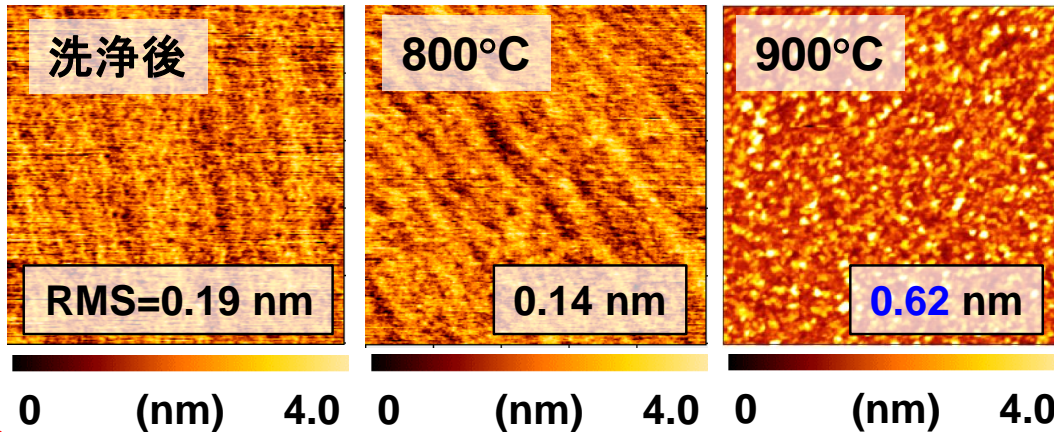


- ・ 酸化膜成長に伴い表面ラフネスが増大
  - ・ 800°C以上で欠陥部位から酸化物粒が成長
- ⇒ MOSデバイス応用×

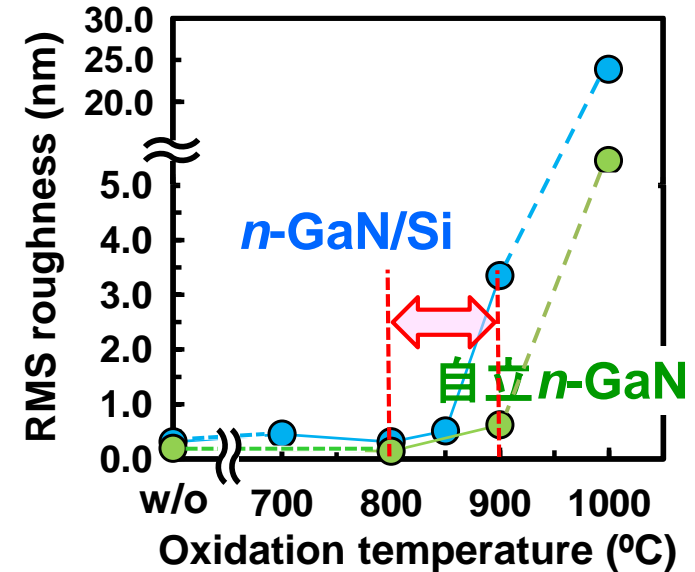
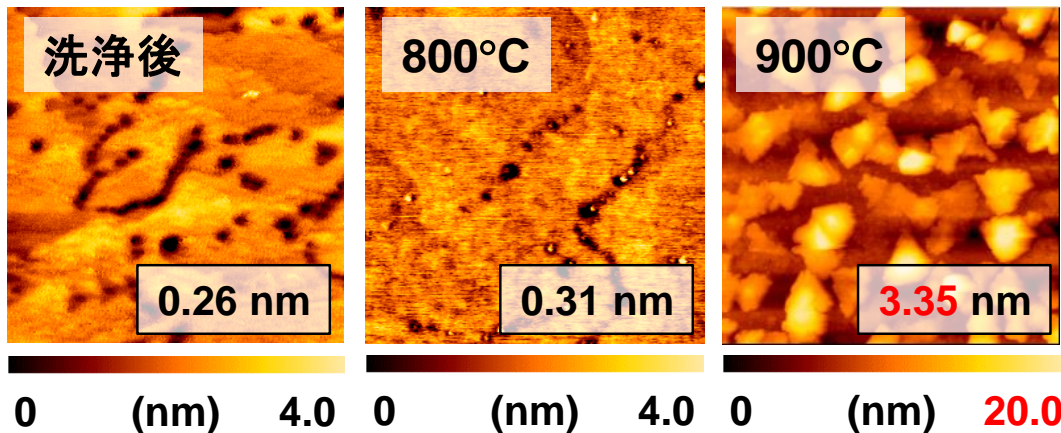
# 低転位密度自立GaN基板の表面酸化

T. Yamada et al., J. Appl. Phys. 121, 035303 (2017).

## $n$ -GaN/GaN (欠陥密度: $\sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ )



## $n$ -GaN/Si (欠陥密度: $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ )



$\text{Ga}_2\text{O}_3$ 膜厚 (分光エリプソ)

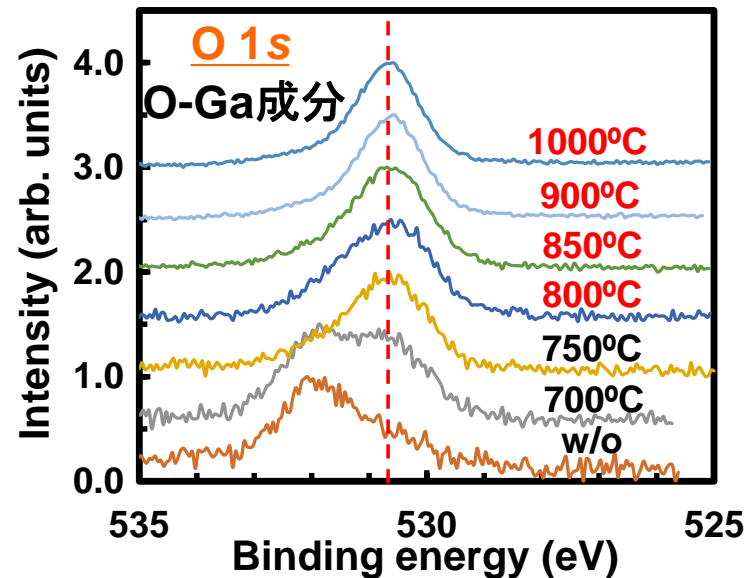
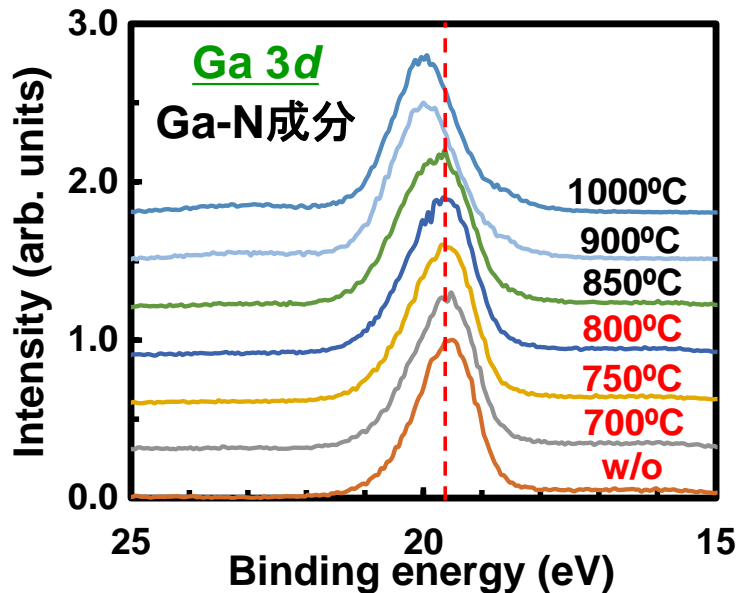
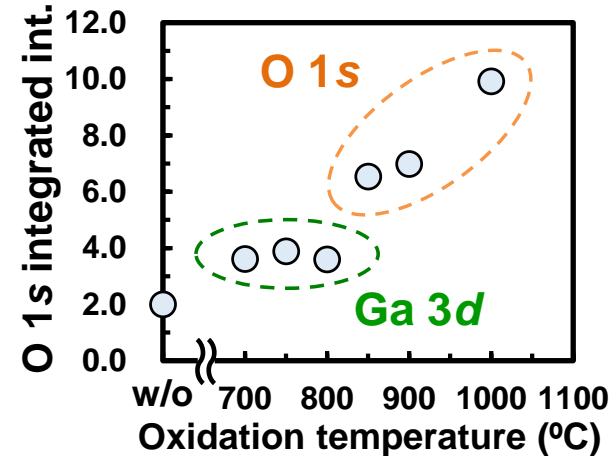
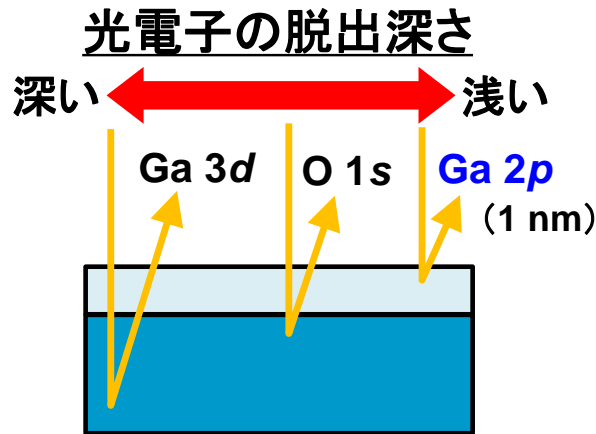
800°C: 1.0 nm

900°C: 3.7 nm

$\Rightarrow \text{Ga}_2\text{O}_3$ 界面層の可能性

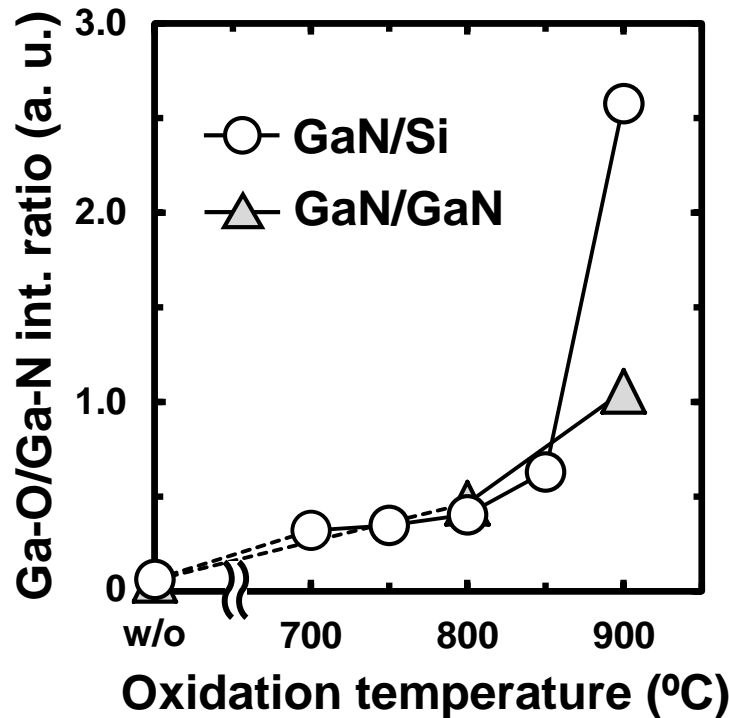
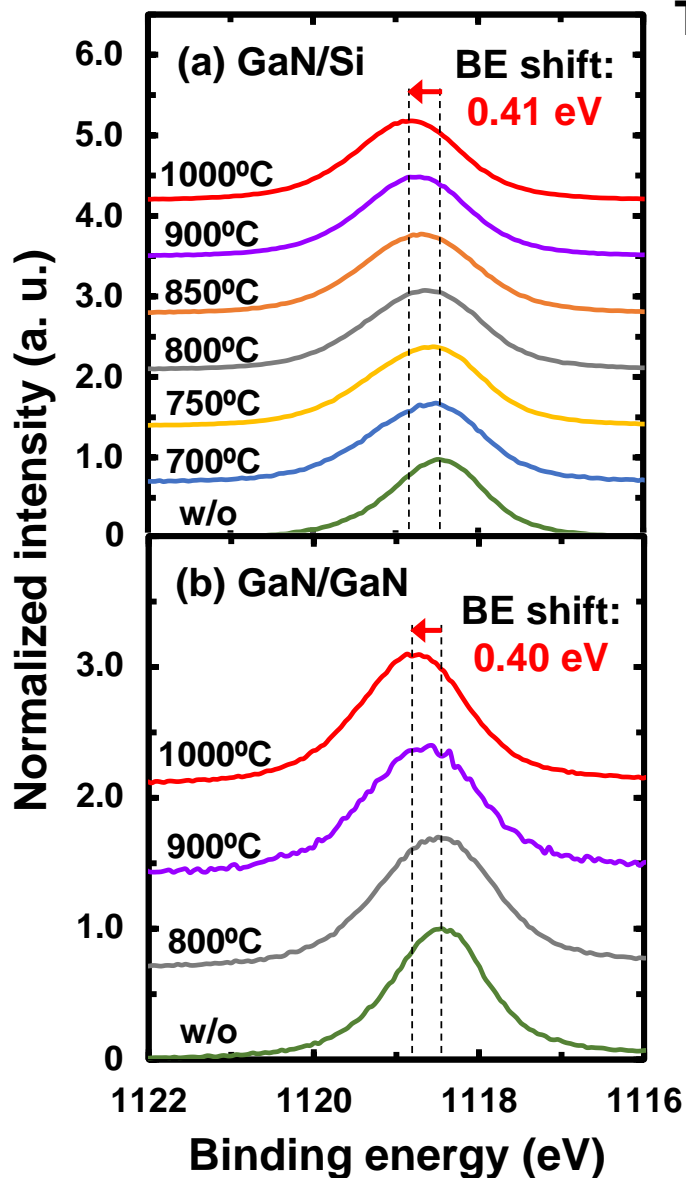
# GaN表面酸化過程のXPS評価

T. Yamada *et al.*, J. Appl. Phys. 121, 035303 (2017).



# 初期酸化過程の評価

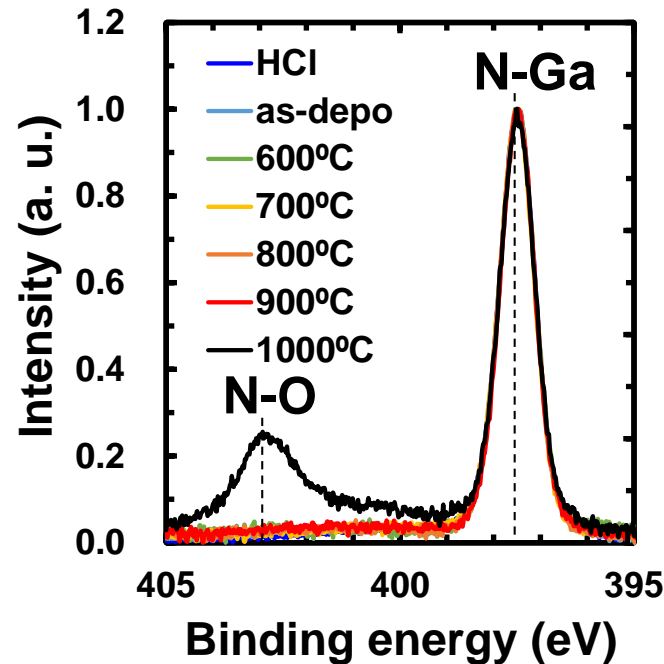
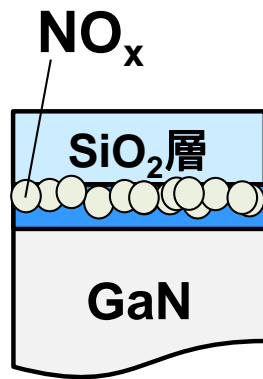
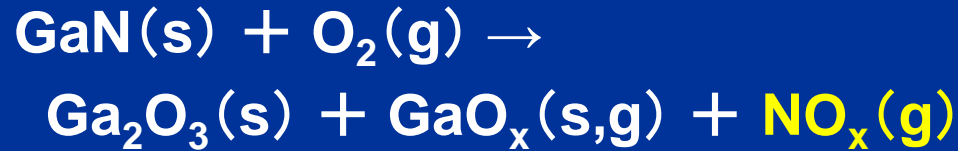
T. Yamada et al., J. Appl. Phys. 121, 035303 (2017).



- ・ ケミカルシフト量の決定 (Ga-O/Ga-N)
- ・ 初期酸化の飽和傾向と900°C以上での酸化膜(島状)成長を確認

# 放射光XPSによる高感度測定

T. Yamada *et al.*, J. Appl. Phys. 121, 035303 (2017).



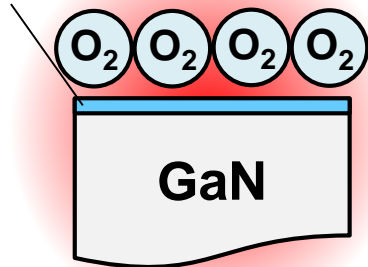
SiO<sub>2</sub>/GaN界面にNO<sub>x</sub>成分が蓄積

# 概要

- ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス
- SiCパワーデバイス開発
  - 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
  - SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造
  - 窒化界面の評価と今後の課題
- GaN-MOSデバイス開発
  - AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
  - GaN表面の熱酸化過程評価
  - 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善
- まとめ

# GaO<sub>x</sub>界面層の挿入による電気特性改善

薄いGaO<sub>x</sub>層 熱酸化

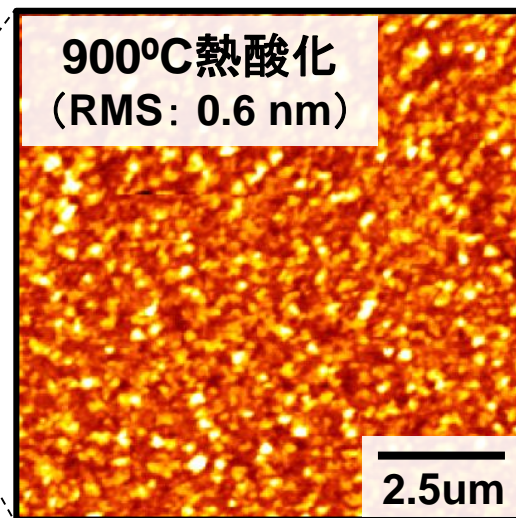


界面の平坦性

SiO<sub>2</sub>成膜(15nm)



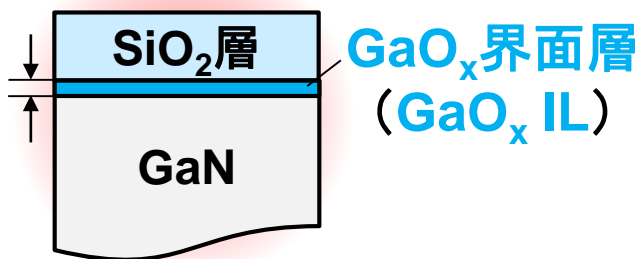
リーク電流の抑制



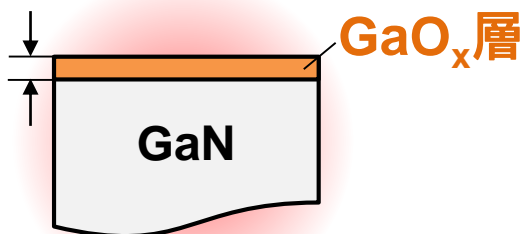
# 後酸化によるSiO<sub>2</sub>/GaO<sub>x</sub>/GaN構造形成

## ■ TEOS-SiO<sub>2</sub>堆積後の後酸化で極薄GaO<sub>x</sub>界面層を形成

### ✓ SiO<sub>2</sub>/GaN構造の酸化

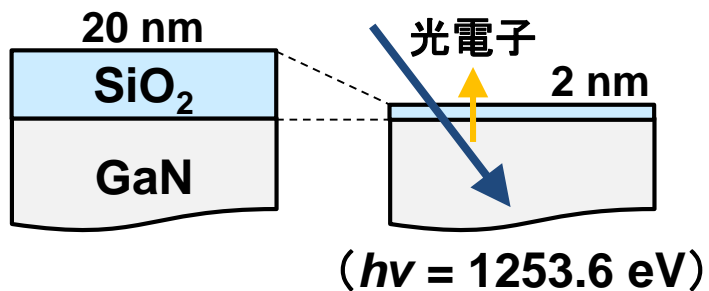


### ✓ GaN表面の直接酸化





# SiO<sub>2</sub>/GaO<sub>x</sub>/GaN界面の放射光XPS分析



(BE較正: N 1sピーク位置)

# GaO<sub>x</sub>界面層の成長過程評価

◆ ピーク分離解析

◆ Ga-O/Ga-N強度比の変化

# SiO<sub>2</sub>/GaO<sub>x</sub>/GaNキャパシタの電気特性評価

## ■ コンダクタンス法による界面準位密度評価

良質なGaO<sub>x</sub>/GaN界面特性を確認(酸化層の積極的な利用)

# 概要

- ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス
- SiCパワーデバイス開発
  - 熱酸化膜界面の構造欠陥評価
  - SiO<sub>2</sub>/SiC界面エネルギーバンド構造
  - 窒化界面の評価と今後の課題
- GaN-MOSデバイス開発
  - AlGaN/GaN MOS-HFET用堆積絶縁膜
  - GaN表面の熱酸化過程評価
  - 極薄GaO<sub>x</sub>界面層によるMOS界面特性改善
- まとめ