

第9回 SPring-8次世代先端デバイス研究会/
第72回 SPring-8先端利用技術ワークショップ
「半導体プロセス開発の現状と放射光の役割」

放射光を活用したGa_N-HEMTの状態解析

2022/1/13

住友電気工業株式会社

伝送デバイス研究所 館野泰範

内容

■ はじめに

- 住友電工のGaN-HEMT事業の紹介
- GaN-HEMTの構造と特長

■ Post-5Gに向けた取り組み

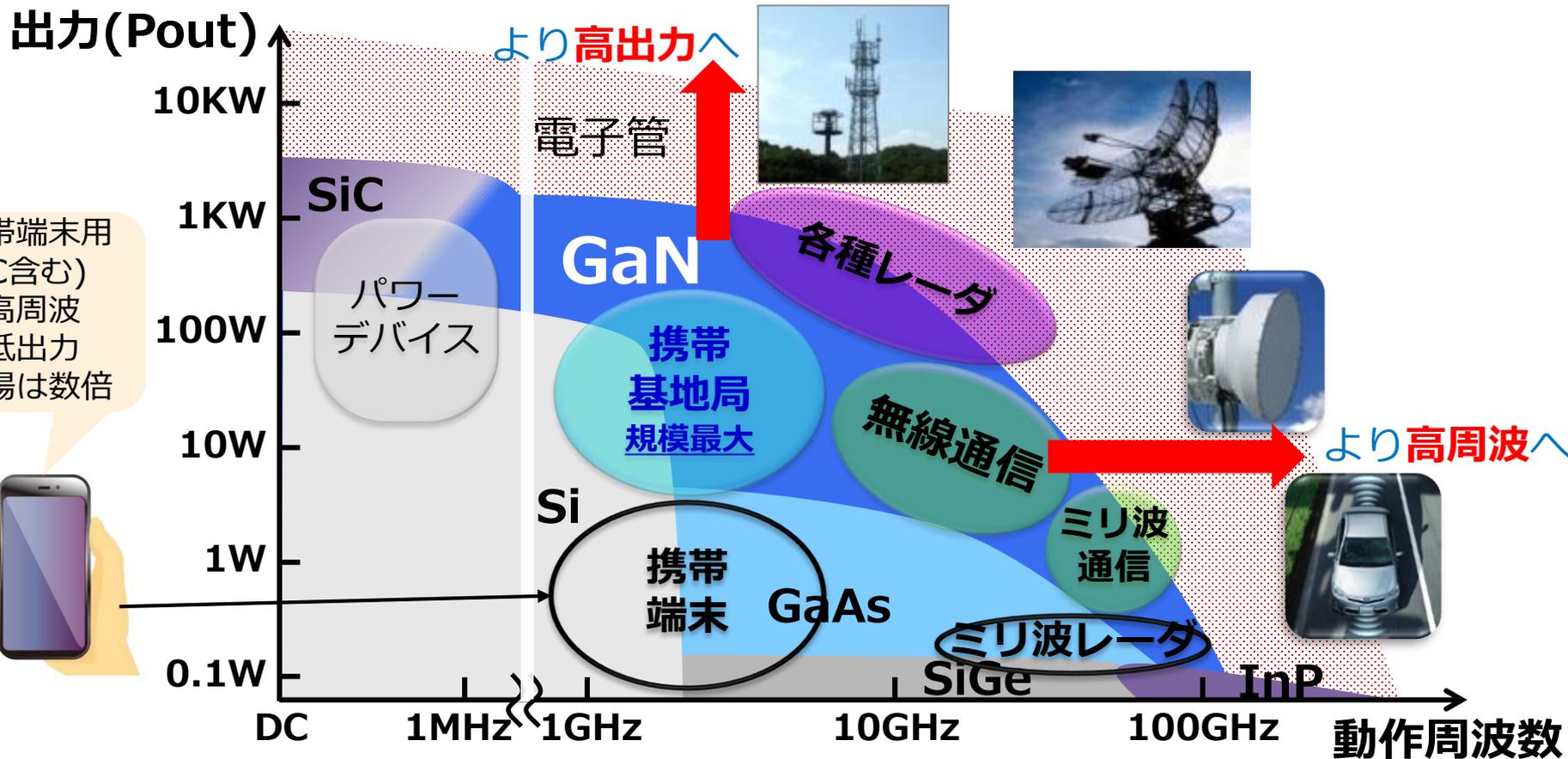
- GaN-HEMTの表面に関する問題：電流コラプス
- 表面状態の放射光解析
 - ・ HAXPES：GaN表面状態評価
 - ・ オペランドnano-ESCA：高電圧印加下の表面状態評価
 - ・ 時間分解XAFS：GaN表面状態の時間変化評価
- 表面状態改善による高効率化

■ まとめ

高周波GaN HEMTの市場

GaN : 窒化ガリウム (Gallium Nitride)

HEMT : 高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor)



より厳しい動作条件・動作状態へ

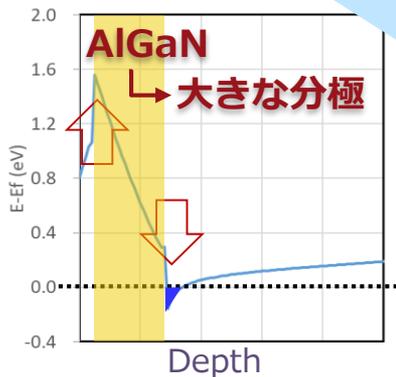
→ 電気特性だけでなく **信頼性の確保** も重要な課題!!

高周波GaN HEMTの構造・特長

① AlGaIn/GaN HEMT

= 2DEG(2次元電子)

→高い電子濃度 & 電子移動度



④ ソースビア構造

→インダクタンス低減

→増幅率(利得)向上

⑤ 半絶縁性SiC基板

→放熱性・信頼性向上

→良好なGaNエピ

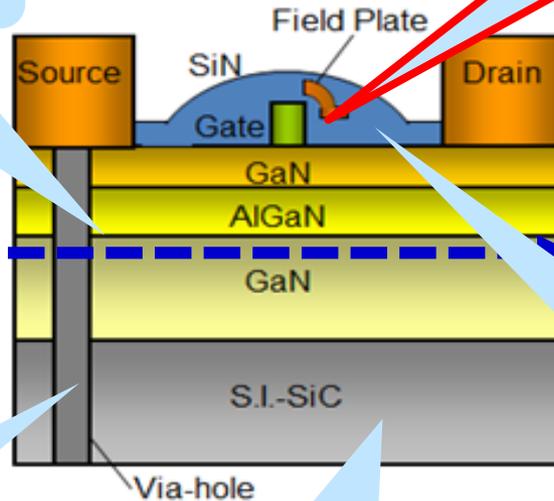
② 表面保護

・ GaN Cap層

・ SiN表面保護膜

→電流コラプスの抑制

= 結晶表面準位低減



高い電流密度
低いオン抵抗
高い破壊電圧
低いgd

③ 高耐圧化

・ 電界緩和電極の採用

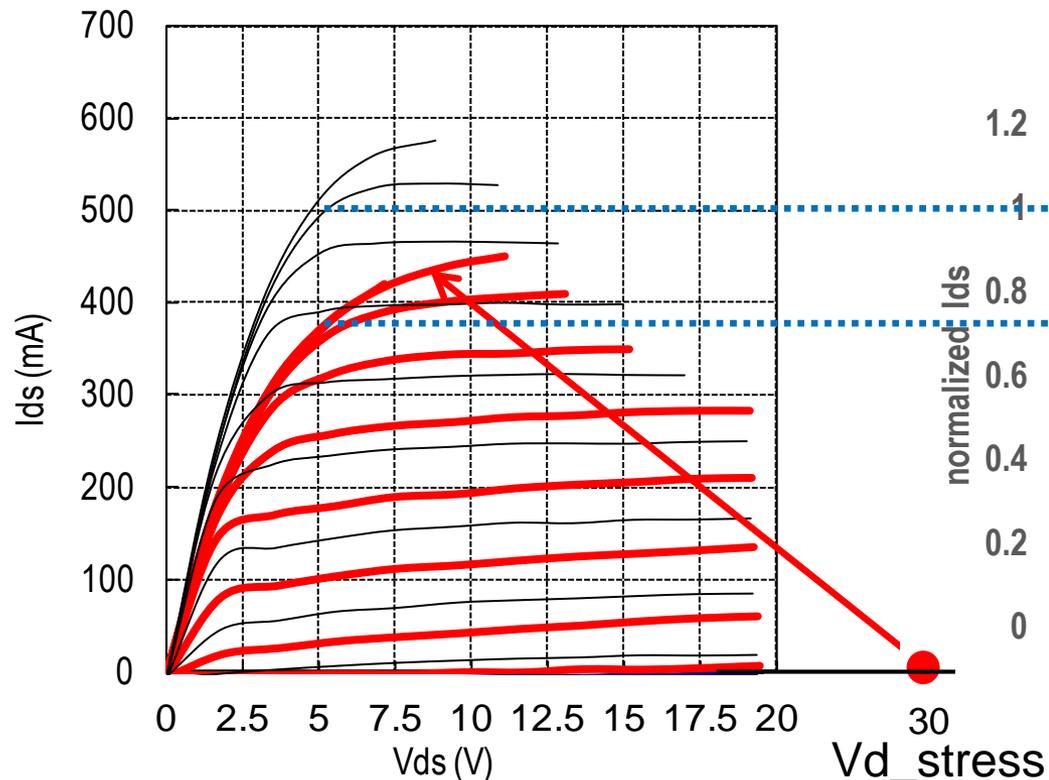
→ゲート端電界の緩和

→帰還容量(Cgd)低減

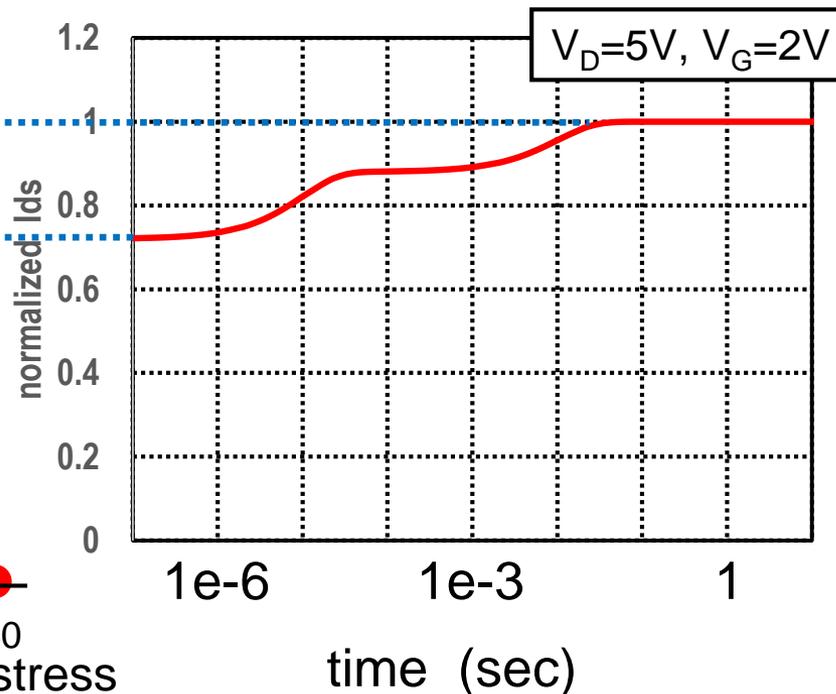
GaNの特性を更に高めるHEMT構造に、高周波特性・信頼性を確保する各施策を実施

本日の講演では、②の取り組みについて紹介

電流コラプス



ドレイン電流の時間変化



黒細線：普通のDC測定

赤太線：瞬間的に高電圧ストレス印加 → ストレス直後に電流測定

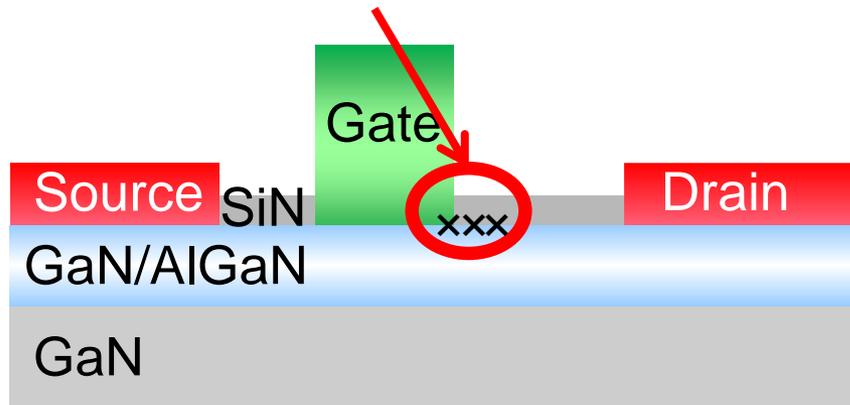
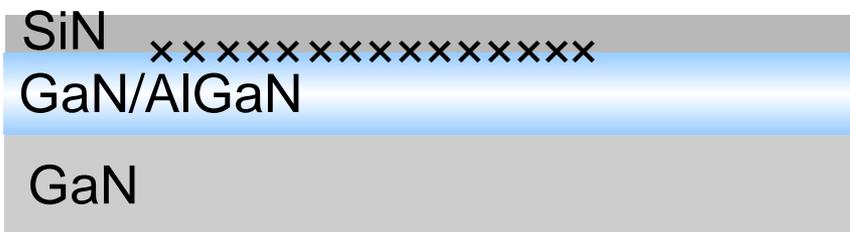
ゲート電極近傍のGaN表面に電子が捕獲されると説明されているが・・・
→ **GaN表面状態**の解析が必須

GaN-HEMT界面状態の放射光評価

SiN成膜条件や成膜前処理の違いによるGaN表面状態の変化を評価したい

ゲート電極端部(ドレイン側)の状態を評価したい

- ・電界が集中する(特に電圧ストレス印加時)
- ・ゲート形成プロセスによる損傷を受ける



プロセス処理(成膜前処理、...)を変えたサンプルの

- ・SiN/GaN界面状態を非破壊定量評価したい

→ **HAXPES**

実際のデバイスの

- ・高電圧ストレス印加時のゲート近傍を狙って評価したい

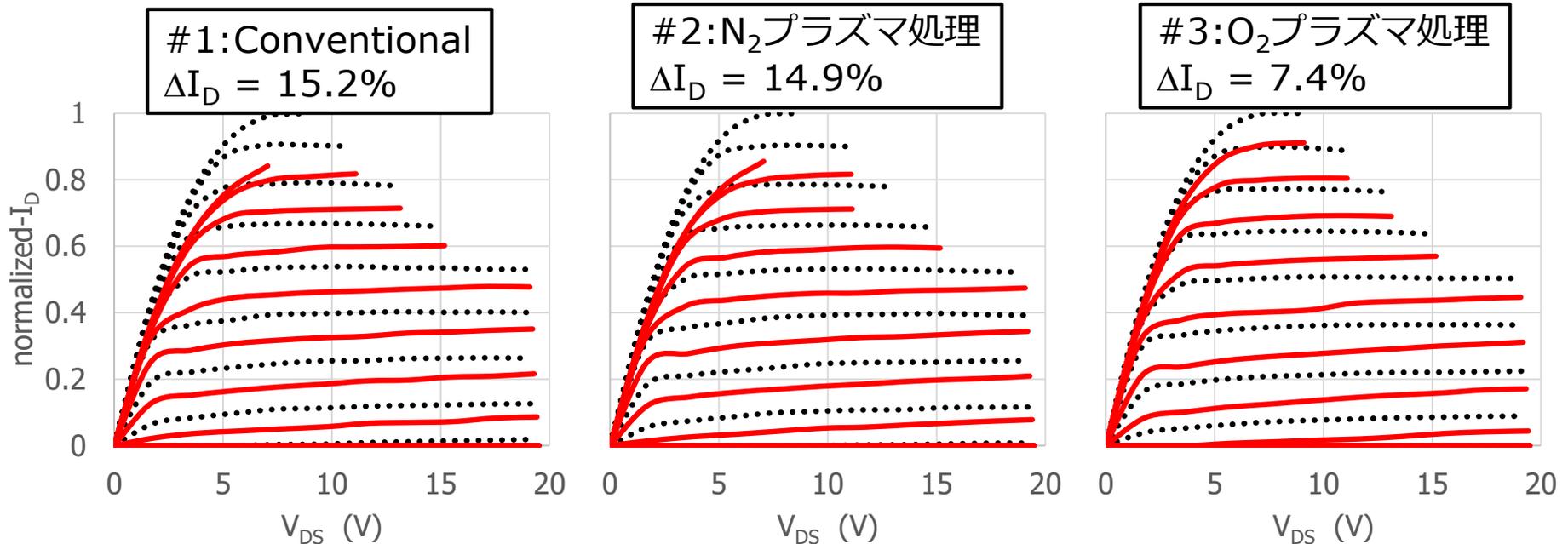
→ **オペランドnano-ESCA**

- ・ストレス印加後からの表面状態の時間変化を捉えたい

→ **時間分解XAFS**

表面状態が異なるGaN-HEMTの電流コラプス特性

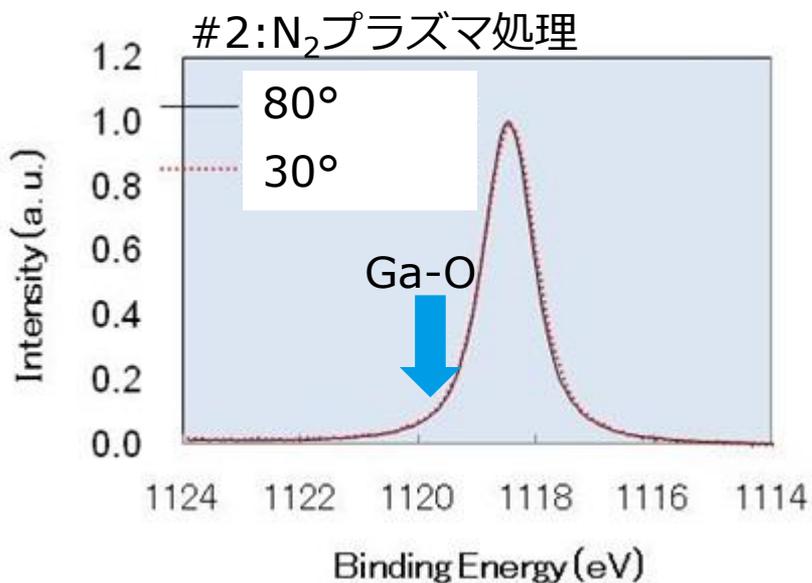
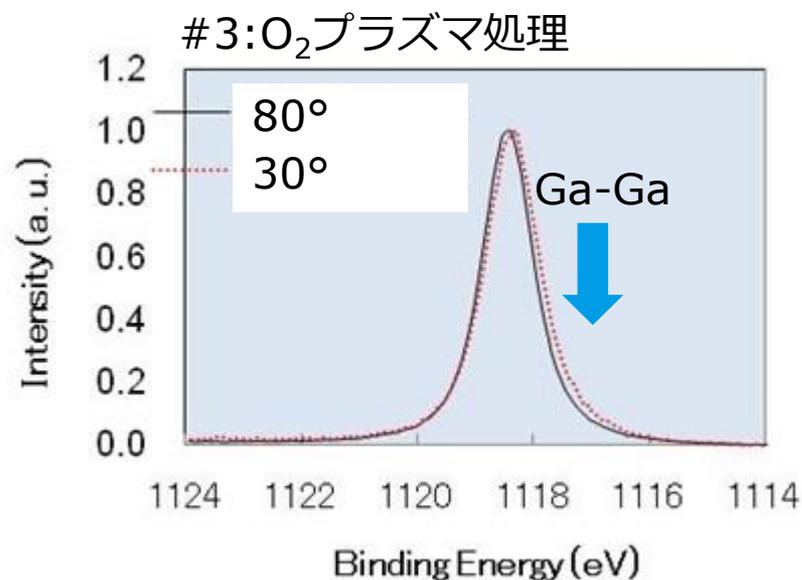
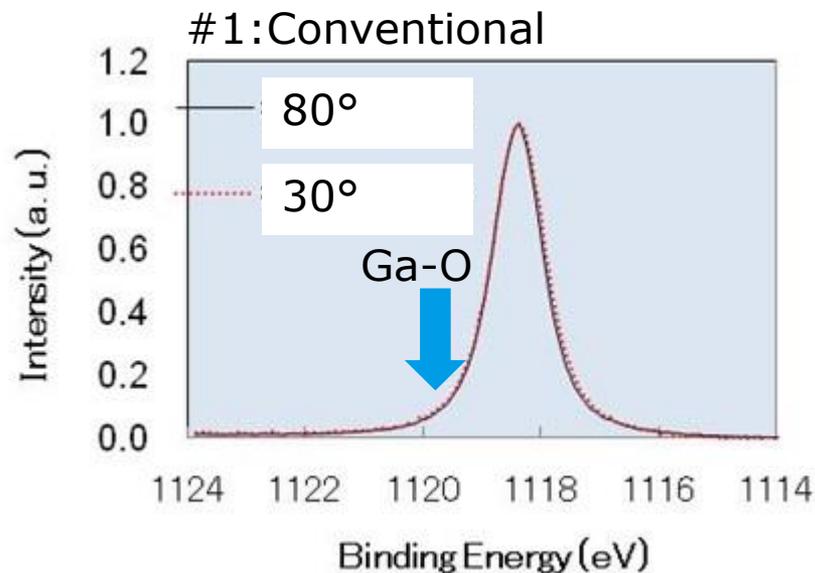
SiN/GaN界面状態が異なる（SiN成膜前処理を変える）サンプルで、電流コラプス特性に違いがある
→ HAXPESにより、SiN/GaN界面状態の違いを評価する



ΔI_D : (V_{DS}, V_{GS})=(5V, 2V)における、高電圧ストレス後の電流減少量

- N_2 プラズマ処理で電流コラプスが若干改善。
- O_2 プラズマ処理で、大きく改善。

Ga2pの比較



- #1と#2では大きな違いは見られず、表面側にGa-O結合が存在
- #3は表面側にGa-Ga結合が存在
→最表面に金属Gaによる電流リークパスが形成されることで、トラップに捕獲された電子の速やかな放出が起きている

オペランド nano-ESCA 評価手法概要

■ 3D nano-ESCA@SPring-8 BL07LSU

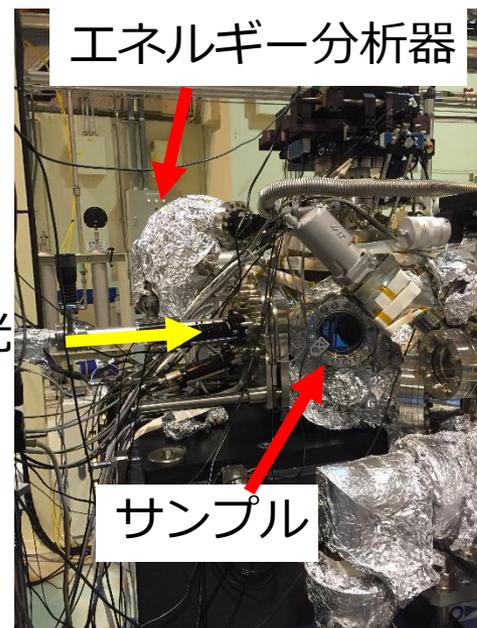
放射光のエネルギー $h\nu$: 850eV~1500eV

水平分解能 : ~70nm

光電子の平均自由行程 : 1~2nm

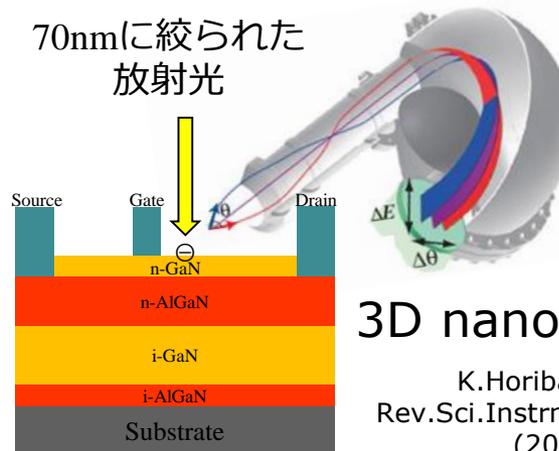
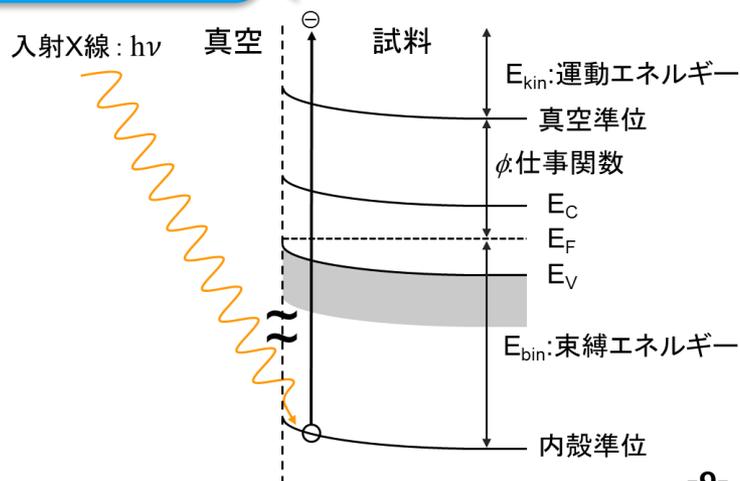
真空度 : 3.3×10^{-7} Pa (測定中)

ストレス電圧 : $(V_G, V_D) = (0, 0), (-5, 30)$ [V]



光電子分光法(ESCA=XPS)

化学組成
化学結合状態
電子状態



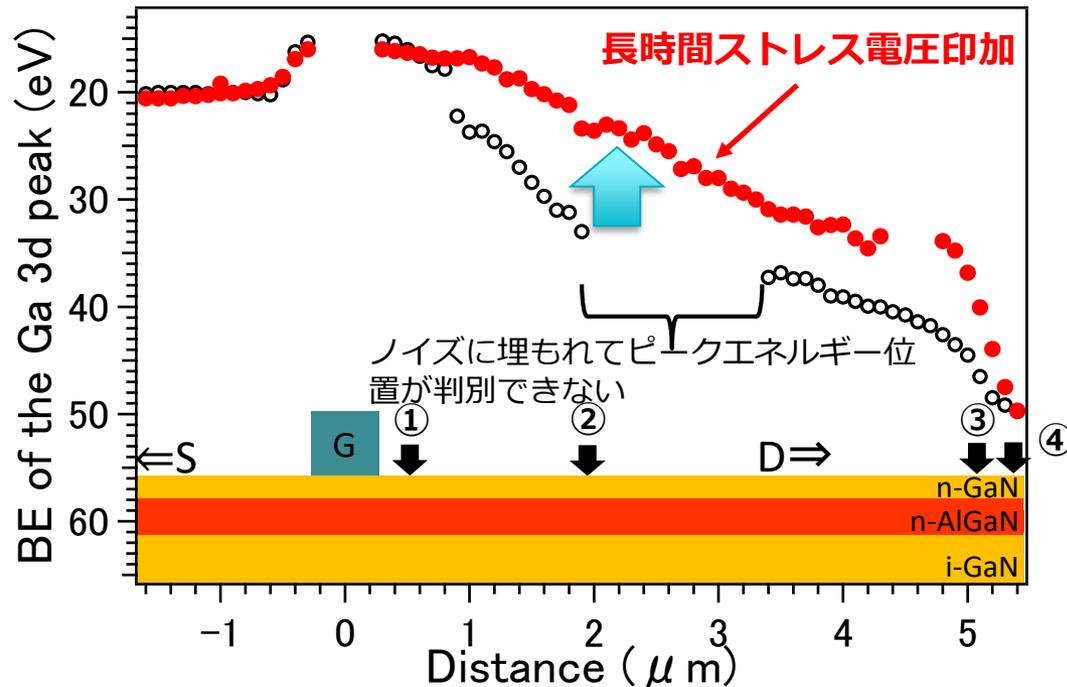
3D nano-ESCA

K.Horiba *et al.*,
Rev.Sci.Instrm.82, 113701
(2011)

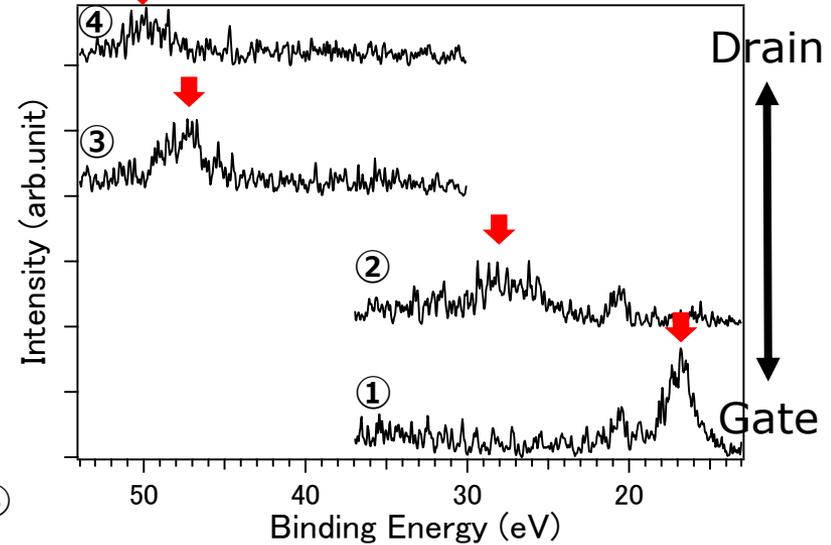
長時間ストレス印加によるスペクトル変化

ストレス電圧条件： $V_G = -5[V]$, $V_D = 30[V]$

Ga 3dスペクトルのピーク位置



Ga 3d スペクトル



バイアス印加でスペクトルがブロードになっている←ビーム面積内でポテンシャル変化があるため？

➤ 長時間ストレス電圧印加で、表面電荷蓄積がDrain側へより広がる。

➤ ゲート端から $1\mu\text{m}$ 程度の領域は、時間変化が見られない。

⇒この領域（いわゆる仮想ゲート電極）はストレス電圧印加直後、すぐに形成されると推測される。

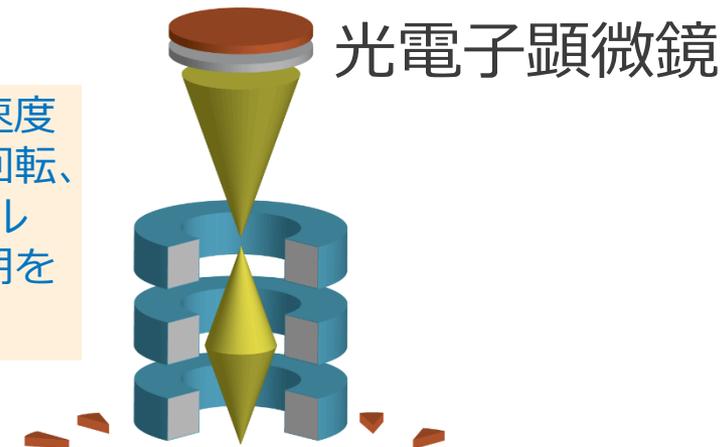
時間分解XAFS測定系

パルス化された
放射光X線



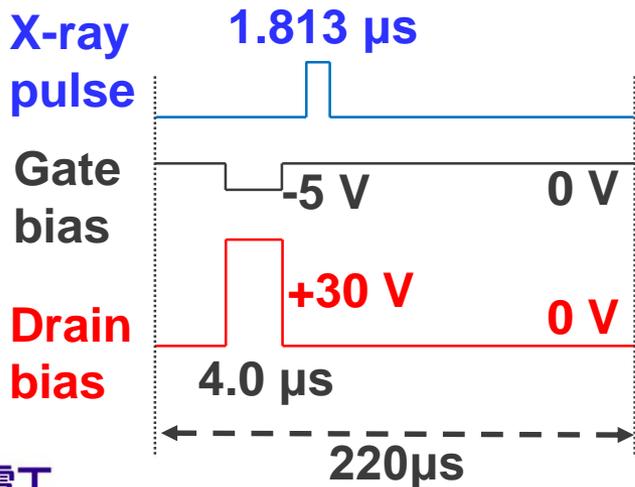
電子バンチの周回速度
と、チョッパーの回転、
GaN-HEMTへのパルス
バイアス印加周期を
同期させる

X-ray
chopper

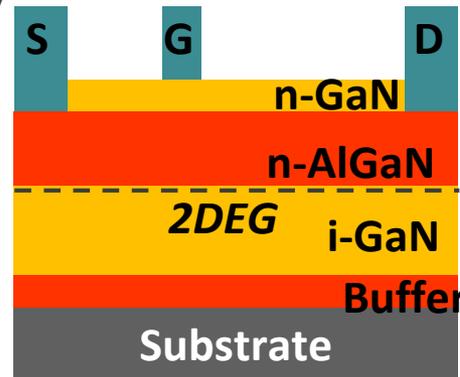


光電子顕微鏡

2万回以上繰り返して
積算し、高い統計精度

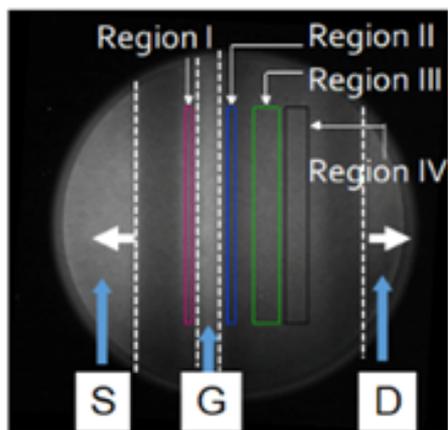


220 μs



時間分解放射光評価

Ga L殻
吸収端

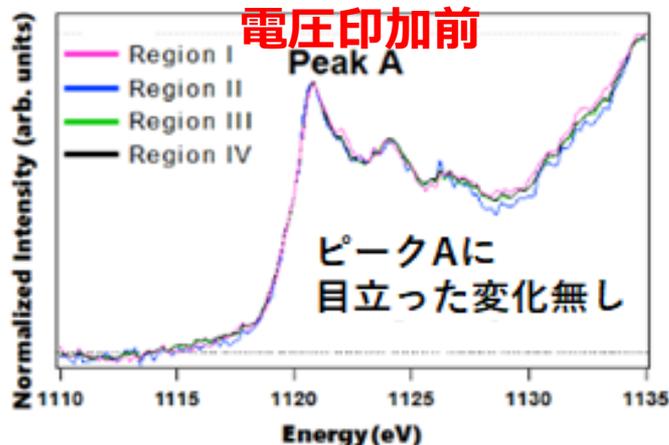


(a)

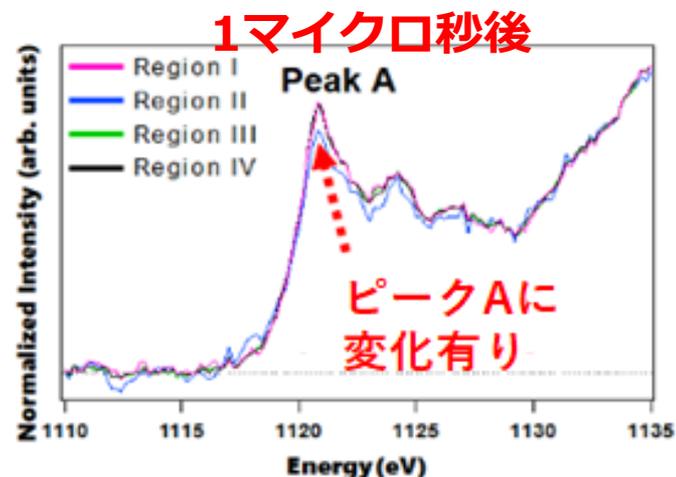
電圧印加off後
ゲート電極近傍

Peak Aが弱化

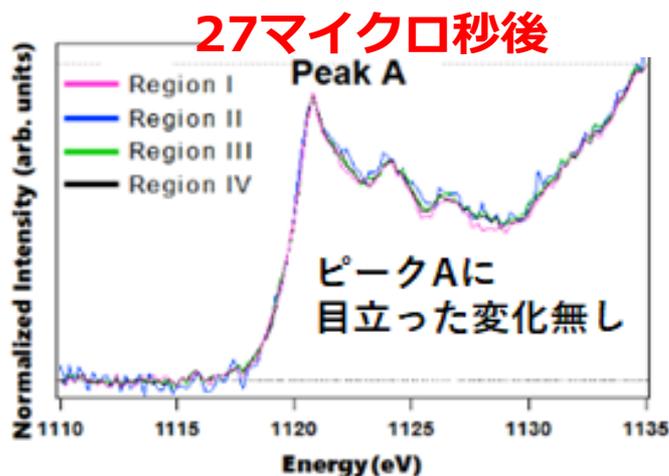
→Ga原子の共有結
合性が大きい



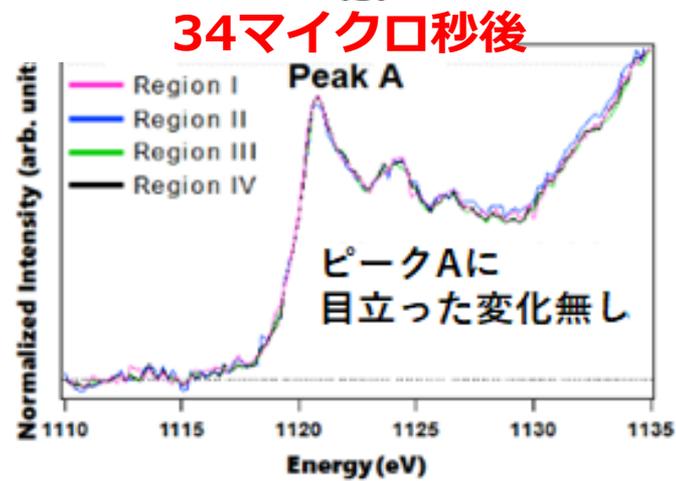
(b)



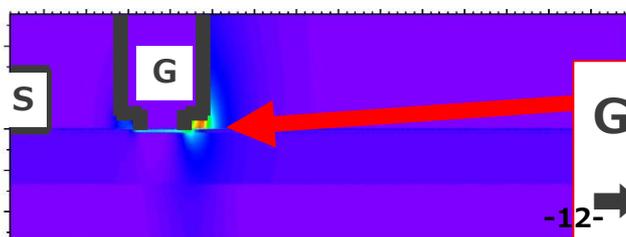
(c)



(d)



(e)



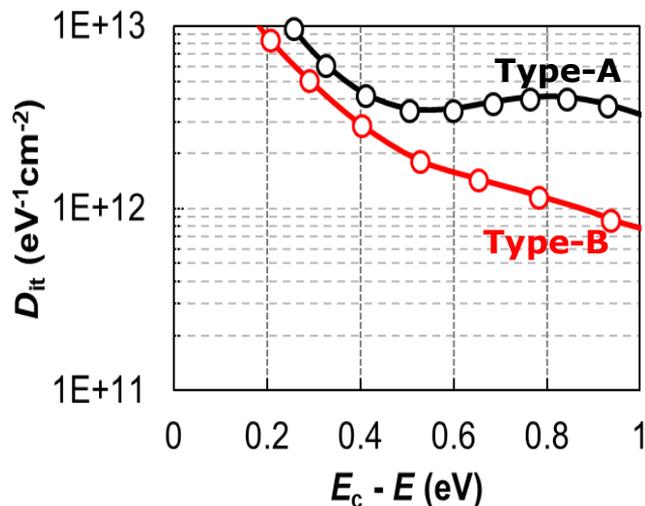
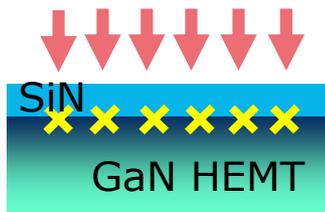
Ga⁺ (ドナー型表面準位) + e⁻

→ Ga (電子捕獲したドナー型表面準位)

表面状態改善：結晶表面のトラップ低減

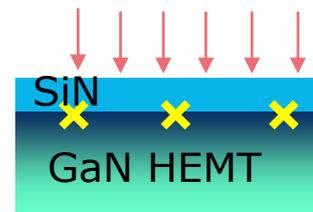
A. Conventional Passivation

Exposure to rather high energy plasma

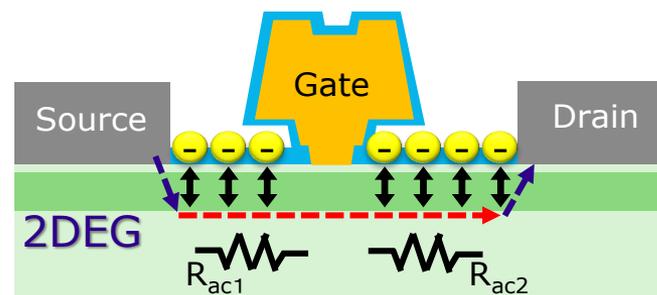


B. Damage Suppressed Passivation

Minimum power for sufficient Si-N reaction

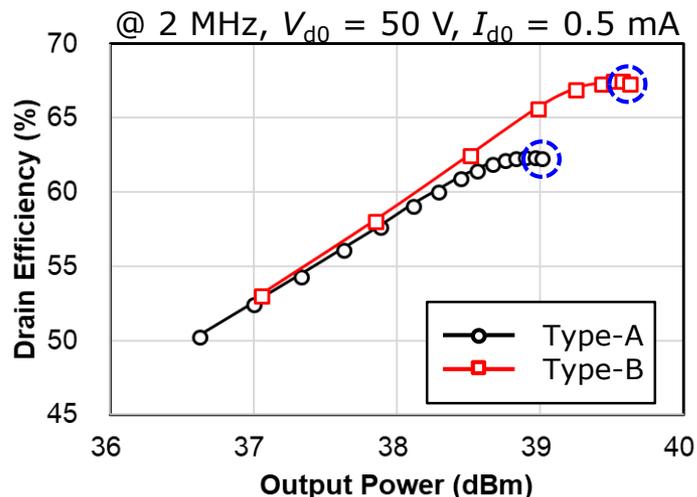
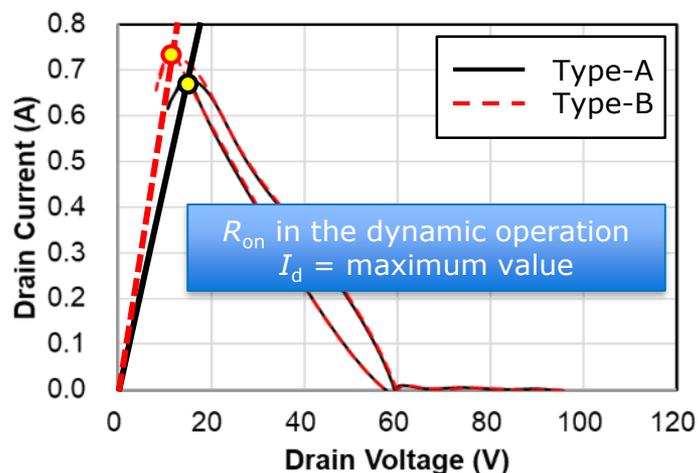


- SiN形成時に界面順位(D_{it})が形成される
- 電子が界面準位に捕獲されると抵抗が増加して電流の低下と、オン抵抗の増大を引き起こす



表面準位の低減による高周波特性の改善

- 界面準位への電子捕獲の低減がdynamic on-resistanceを改善する (左図).
- 結果として、出力と効率の両特性が改善する (右図・表).



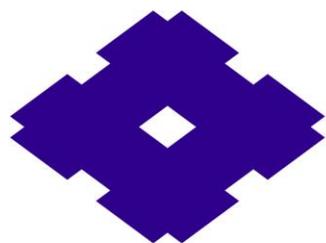
K. Kikuchi et.al, "Comparison of GaN HEMT Technology Processes by Large-Signal Low-Frequency Measurements," 2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC)

GaN表面状態の改善により出力・効率が改善

2 MHz	Output Power	Drain Efficiency
Type-A	8.0 W	62.3 %
Type-B	9.1 W	67.4 %

まとめ

- Post-5Gに向けたGa_N-HEMT開発の取り組みの一環として、放射光を活用した各種の状態評価を実施
- 表面処理条件の違いによって
 - 最表面のGa-N結合、Ga-O結合、Ga-Ga結合のそれぞれの配分によって電流コラプスが異なる。
 - 特にGa-Ga結合が多いほど特性は改善
- 高電圧印加によって
 - ゲート電極横に電子捕獲領域が形成され、その領域の表面ポテンシャルが上昇
 - 時間分解評価によって、ゲート横電子捕獲領域の状態時間変化を捉えることができた



住友電工

<http://www.sei.co.jp>