

HAXPESによるAlGa_N/Ga_N界面の2DEG生成メカニズム調査

南條 拓真, 今澤 貴史, 清井 明, 綿引 達郎, 三浦 成久

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所

三菱電機株式会社

© Mitsubishi Electric Corporation

1

アウトライン

1. 背景

半導体材料の物性値/適用領域
従来型AlGa_N/Ga_N HEMT構造/動作メカニズム

2. EID AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT試作/評価

新規EID AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT構造の提案
特性評価結果

3. EID構造による2DEG制御検証

実証実験内容
電気特性評価による2DEG誘起実証
HAXPESによる2DEG誘起メカニズム検証

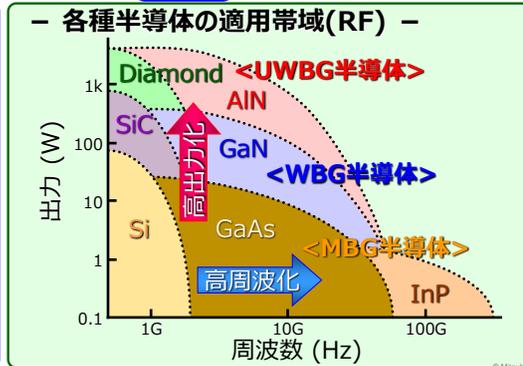
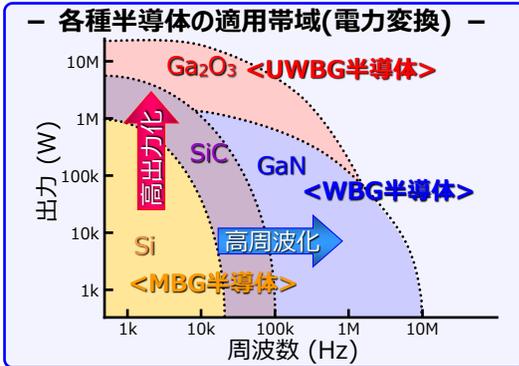
4. まとめ

2

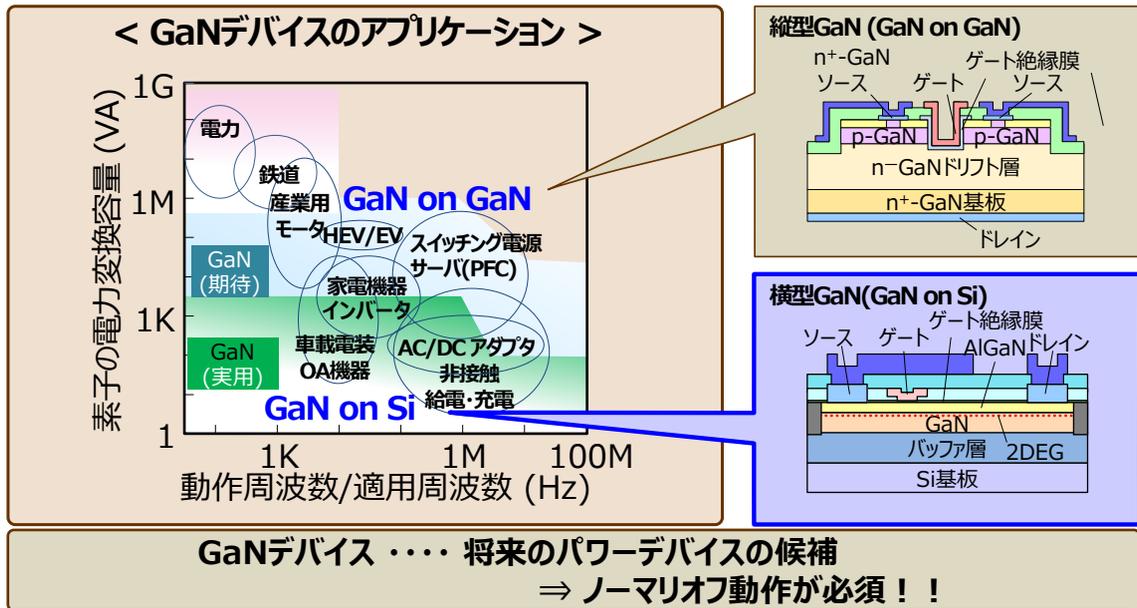
© Mitsubishi Electric Corporation 2

バルク半導体の特性比較

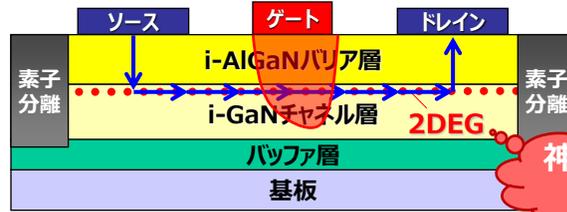
	Middle Band-Gap		Wide Band-Gap		Ultra Wide Band-Gap		
	Si	GaAs	SiC	GaN	Ga ₂ O ₃	Diamond	AlN
バンドギャップ E _g (eV)	1.12	1.42	3.26	3.4	4.6~4.9	5.47	6.2
絶縁破壊電界 E _c (×10 ⁶ V/cm)	0.3	0.4	3	3.3	6~8	8	12
熱伝導度 l (W/cmK)	1.5	0.55	4.9	1.5	0.23	32	2.9
電子移動度 m _e (cm ² /Vs)	1500	8500	1000	2000	250	1800	1090
飽和電子速度 v _{sat} (×10 ⁷ cm/s)	1	2	2	2.5	2.0	2.7	2.2
ヘテロ接合	×	○	×	○	△	×	○



GaNパワーデバイスのアプリケーションと構造



AlGa_N/Ga_N HEMT (横型 Ga_N) の動作原理

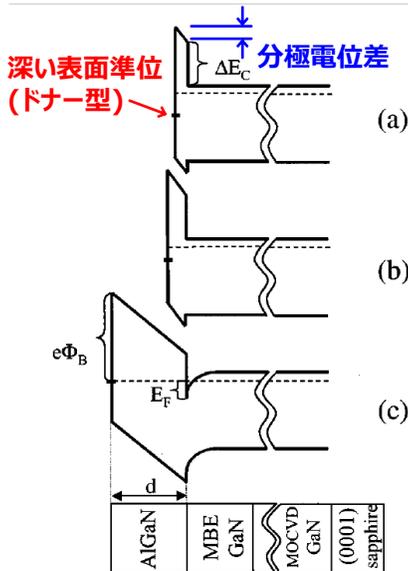


神様からの贈り物

AlGa_N/Ga_N HEMTの動作原理

- チャンネル：i-AlGa_N/i-GaN界面に発生する**高速/高濃度の2次元電子ガス(2DEG)**
- 電流：ソース → 2DEG → ドレイン
- ショットキー接触となるゲート電極から広がる空乏層により電流を制御

2DEG生成メカニズム ※1



<前提条件>

- ・AlGa_N層には自発/ピエゾ分極による電位差が発生
- ・AlGa_N表面には深いドナー型の表面準位が形成

(a) AlGa_Nバリア層が薄い場合

分極電位差が小さいため、AlGa_N表面の深い準位が E_F 以下に位置
表面準位はイオン化せずに中性の状態を維持→2DEGなし

(b)

(b) AlGa_Nバリア層が少し厚くなった場合

分極電位差が大きくなるが、依然としてAlGa_N表面準位が E_F 以下に位置
表面準位はイオン化せずに中性の状態を維持→2DEGなし

(c)

(c) AlGa_Nバリア層がかなり厚くなった場合

分極電位差が大きくなり、AlGa_N表面準位が E_F に位置

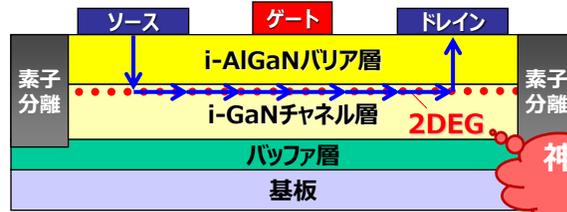
表面準位の一部がイオン化して正に帯電

→系の電荷バランスを維持するために、AlGa_N/Ga_N界面に2DEGが生成
(AlGa_N/バリア層上下の正負電荷分だけ分極による電位差は減少)

AlGa_Nバリア層の表面準位と分極電位差によって2DEG増減
従来：AlGa_N層厚とAl組成で分極電位差を制御→2DEG制御

※1 Smorchkova et al. J. Appl. Phys., 86, 4520 (1999)

AlGa_N/Ga_N HEMT（横型Ga_N）の動作原理



AlGa_N/Ga_N HEMTの動作原理

- チャンネル：i-AlGa_N/i-GaN界面に発生する高速/高濃度の2次元電子ガス(2DEG)
- 電流：ソース → 2DEG → ドレイン
- ショットキー接触となるゲート電極から広がる空乏層により電流を制御

ゲート電極に電圧を印加していない状態(0V)

- チャンネル：i-AlGa_N/i-GaN界面に高濃度の2次元電子ガス(2DEG)が存在
- 電流：ソース → 2DEG → ドレイン



ノーマリオフ動作ができない！

⇒少なくともゲート電極直下の2DEGをなくさないといけない！！

従来型AlGa_N/Ga_N HEMTの構造と特徴

従来型構造	ノーマリオフ動作構造	ノーマリオフ動作構造
<p>Schottky metal source gate / drain AlGa_N Ga_N 2DEG SiC or Si substrate</p>	<p>p-GaN source gate / drain AlGa_N Ga_N 2DEG Si substrate</p> <p>[1] Y. Uemoto et al, IEEE TED 54 (2007) 3393</p>	<p>Recess & insulator source gate / drain AlGa_N Ga_N 2DEG Si substrate</p> <p>[2] M. Kanamura et al, IEEE EDL 31 (2010) 189</p>
<p>シンプルなプレーナ型HEMT</p> <p>ノーマリオン動作 高い安定性/信頼性</p>	<p>p-GaN層のドライエッチング</p> <p>ドライエッチングによる選択エッチングが必要不可欠</p> <p>(Al)GaN層のドライエッチング → 高エネルギーが必要</p>	<p>AlGa_N層のドライエッチング</p> <p>エッチングダメージ 不均一性</p>

電力スイッチングデバイス：高い安定性と信頼性を兼ね備えたノーマリオフ動作が必須
⇒ドライエッチングプロセスを使わずにノーマリオフ動作を製造することがキーポイント

新規EID AlGa_N/Ga_N MOS-HEMTの構造と特徴

<MOSゲート構造>

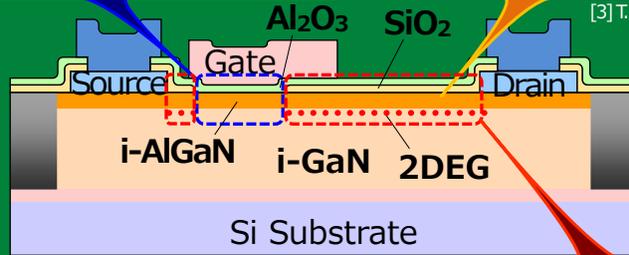
ゲート電極の高ポテンシャル障壁化

➔ ゲートリーク電流 (オン時) の抑制

<薄膜AlGa_Nバリア層>

薄膜化による分極効果の抑制

➔ ヘテロ界面の2DEGを完全空乏化



[3] T. Nanjo et al, JJAP, 58 (2019) SBDD09

[4] T. Nanjo et al, EL (2021)

<Extrinsically Electron Induced by Dielectric (EID) 構造>

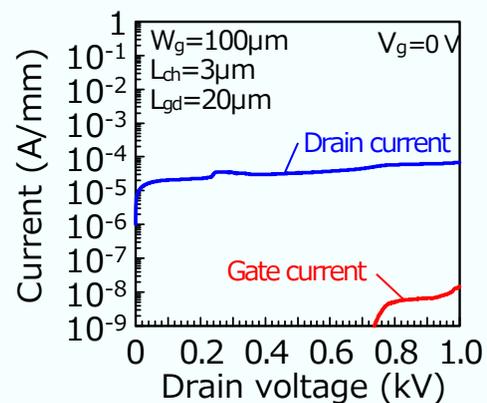
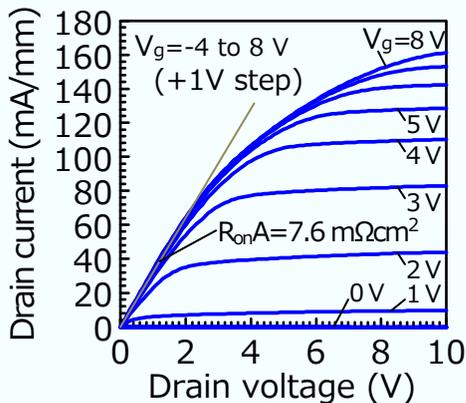
SiO₂膜堆積 (PECVD) / 高温熱処理 (800~850℃)

➔ アクセス/ドリフト領域のみの2DEGの選択的誘起を実現

ドライエッチングレスプロセスにて作製可能なEID AlGa_N/Ga_N MOS-HEMT
低オン抵抗, 高耐圧, ノーマリオフ, 高い安定性, 高信頼性が期待される!

© Mitsubishi Electric Corporation

I_d-V_d, I_g-V_d特性 (EID MOS-HEMT)



Eモード動作 ← 薄膜AlGa_Nバリア層

低オン抵抗 ($R_{on}A = 7.6 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$)

高耐圧 (1 kV 以上)

← EID構造による2DEG誘起

➔ 高出力スイッチングデバイス用トランジスタとして十分な性能を実証

© Mitsubishi Electric Corporation

EID構造による2DEG誘起の調査

サンプル試作プロセス

- **AlGa_N/Ga_Nエピ成長**
- **コンタクトイオン注入領域形成**
 $^{28}\text{Si}^+$, 50 keV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
- **活性化熱処理**
RTA 1150 °C, 5 min, N₂
- **オーミック電極形成**
Ti/Nb/Pt with RTA
- **素子分離領域形成**
Ion implantation
- **配線電極形成**
Ti/Au
- **電子供給絶縁膜 (EID) 堆積**
PECVD SiO₂
- **電子誘起アニール**
RTA 800 °C, 30 sec, N₂

サンプル断面構造

EID構造による2DEG誘起の調査

サンプル試作プロセス

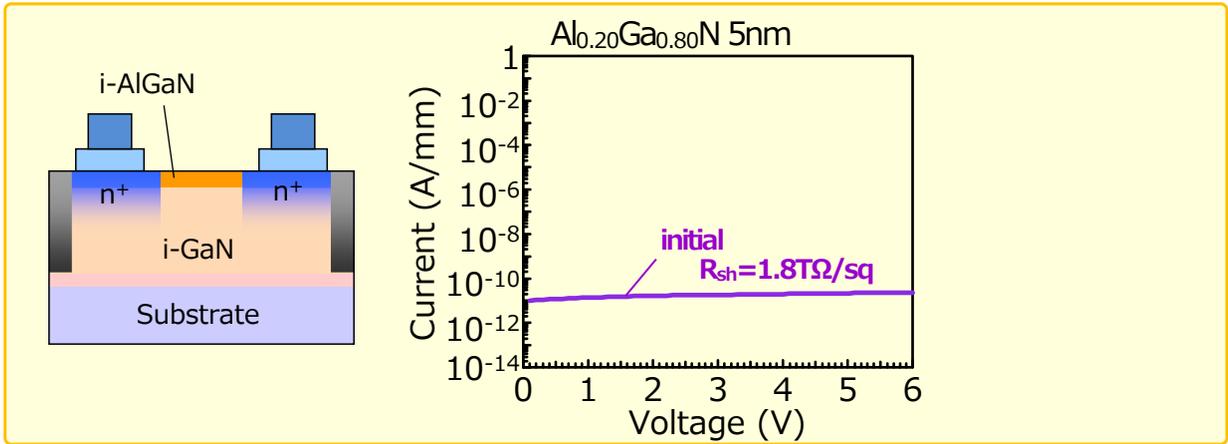
- **AlGa_N/Ga_Nエピ成長**
- **コンタクトイオン注入領域形成**
 $^{28}\text{Si}^+$, 50 keV, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
- **活性化熱処理**
RTA 1150 °C, 5 min, N₂
- **オーミック電極形成**
Ti/Nb/Pt with RTA
- **素子分離領域形成**
Ion implantation
- **配線電極形成**
Ti/Au
- ● **電子供給絶縁膜 (EID) 堆積**
PECVD SiO₂
- ● **電子誘起アニール**
RTA 800 °C, 30 sec, N₂
- ● **EID膜除去**
Buffered HF dipping

サンプル断面構造

評価項目

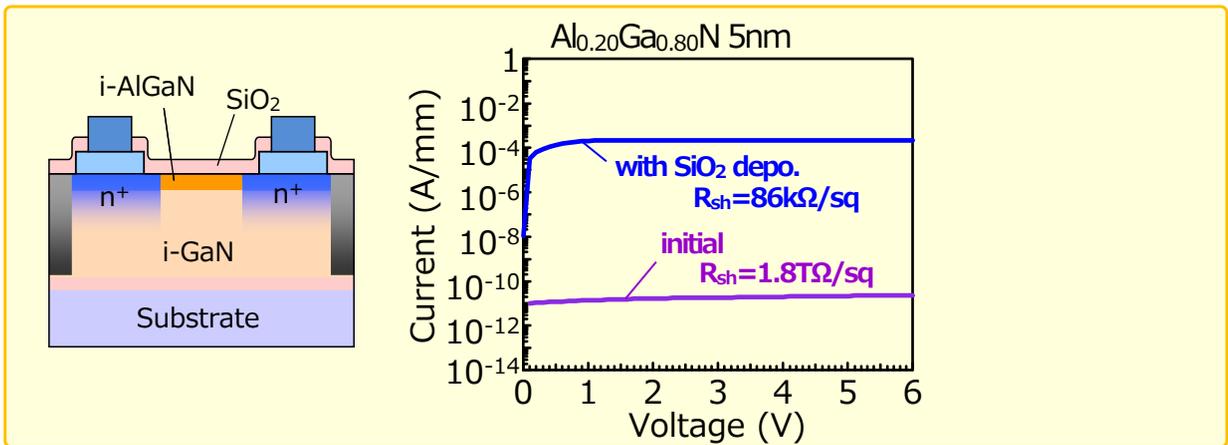
- 電特評価 (I-V特性/Hall特性)
- HAXPES@SP-8
AlGa_N表面近傍の電子状態分析

EID 構造における I-V 特性の変化



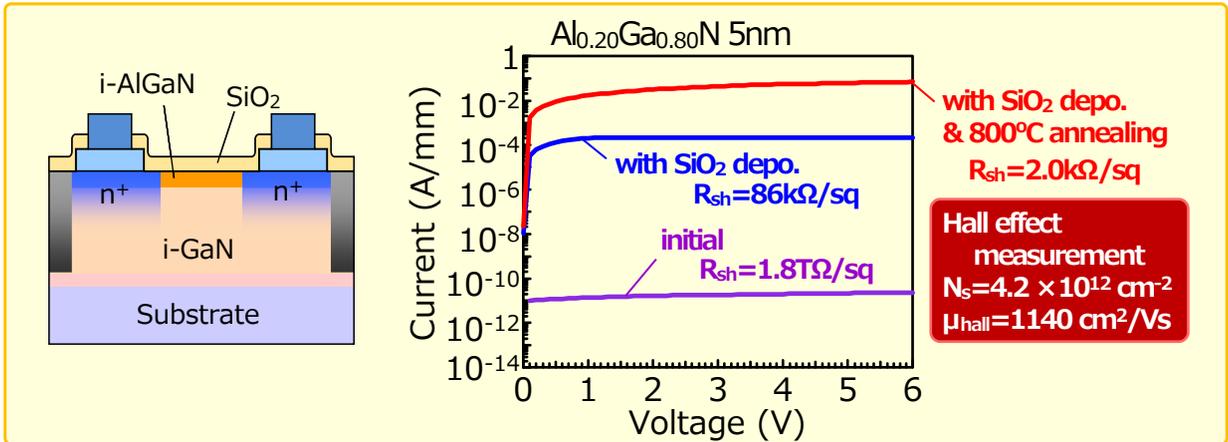
初期状態：超高抵抗（2DEGは完全に空乏化された状態）

EID 構造における I-V 特性の変化



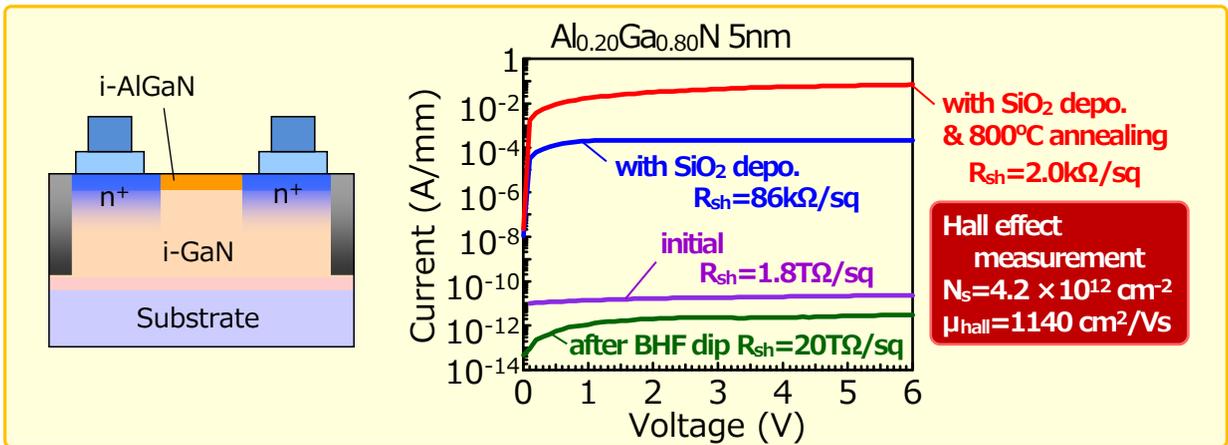
初期状態：超高抵抗（2DEGは完全に空乏化された状態）
EID膜（SiO₂）堆積：低抵抗化（2DEGが増加）

EID 構造における I-V 特性の変化



初期状態：超高抵抗（2DEGは完全に空乏化された状態）
 EID膜（SiO₂）堆積：低抵抗化（2DEGが増加）
 800°C アニール：さらなる低抵抗化（さらなる2DEGの増加）

EID 構造における I-V 特性の変化



初期状態：超高抵抗（2DEGは完全に空乏化された状態）
 EID膜（SiO₂）堆積：低抵抗化（2DEGが増加）
 800°C アニール：さらなる低抵抗化（さらなる2DEGの増加）
 BHF浸漬：超高抵抗化（初期状態への回復 = 2DEGの完全空乏化）

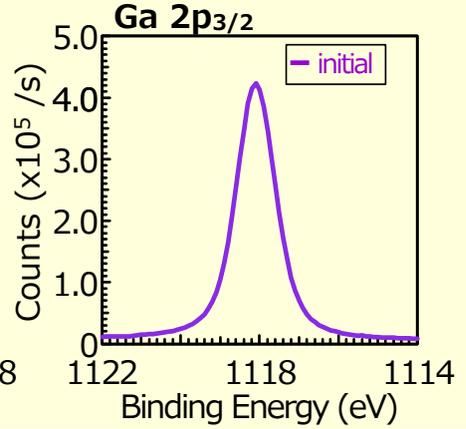
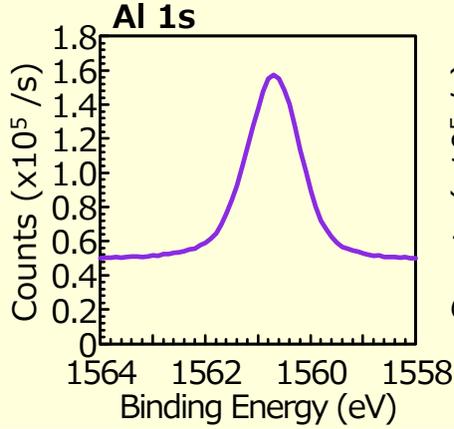
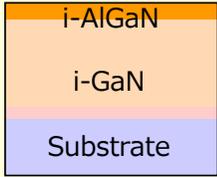
HAXPESによるAlGaN表面近傍の電子状態分析

Spring-8 BL16XU

X-ray energy : 7948.2 eV

pass energy : 200 eV

take-off angle : 88°



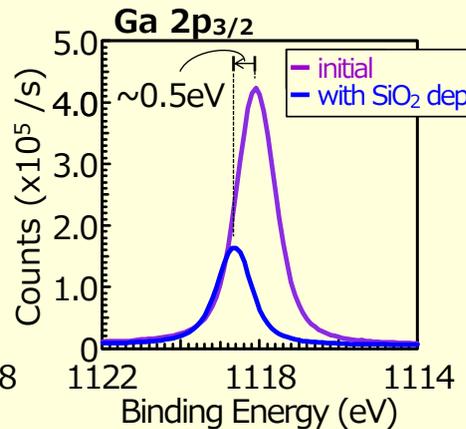
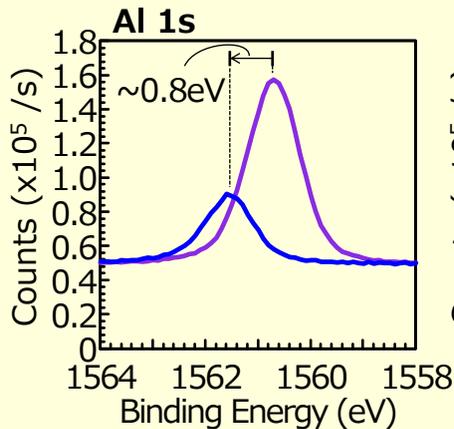
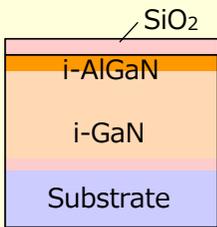
HAXPESによるAlGaN表面近傍の電子状態分析

Spring-8 BL16XU

X-ray energy : 7948.2 eV

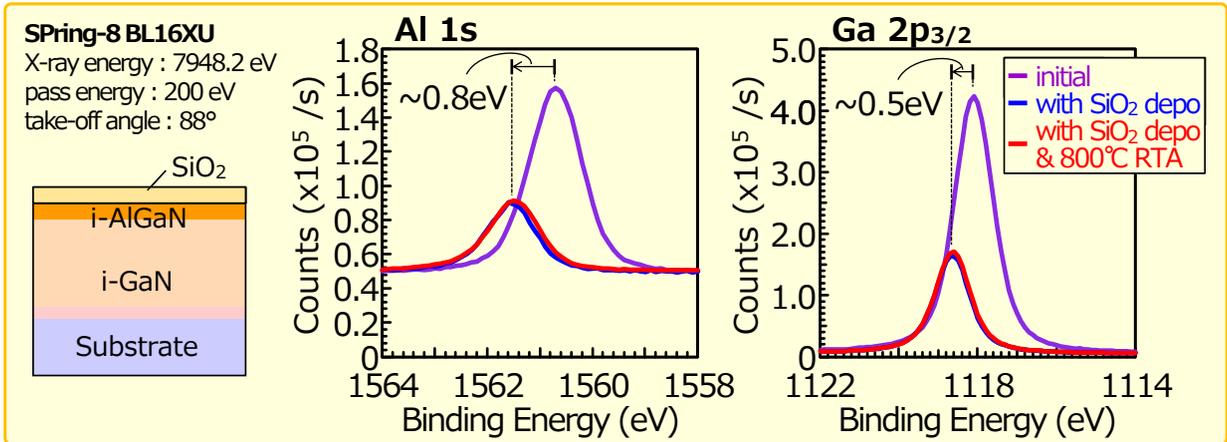
pass energy : 200 eV

take-off angle : 88°



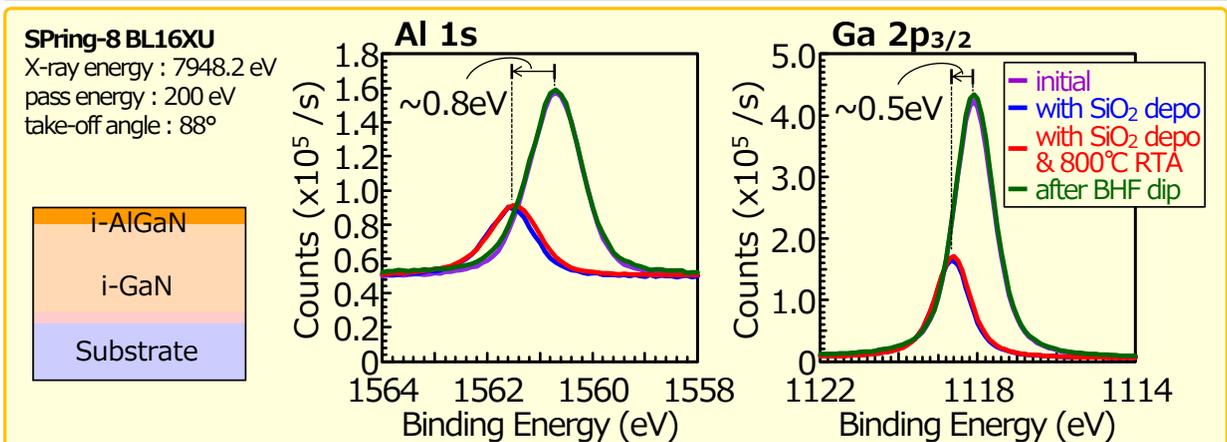
EID膜 (SiO₂) 堆積 : スペクトルが高エネルギー側にシフト (表面ポテンシャルの減少)

HAXPESによるAlGaN表面近傍の電子状態分析



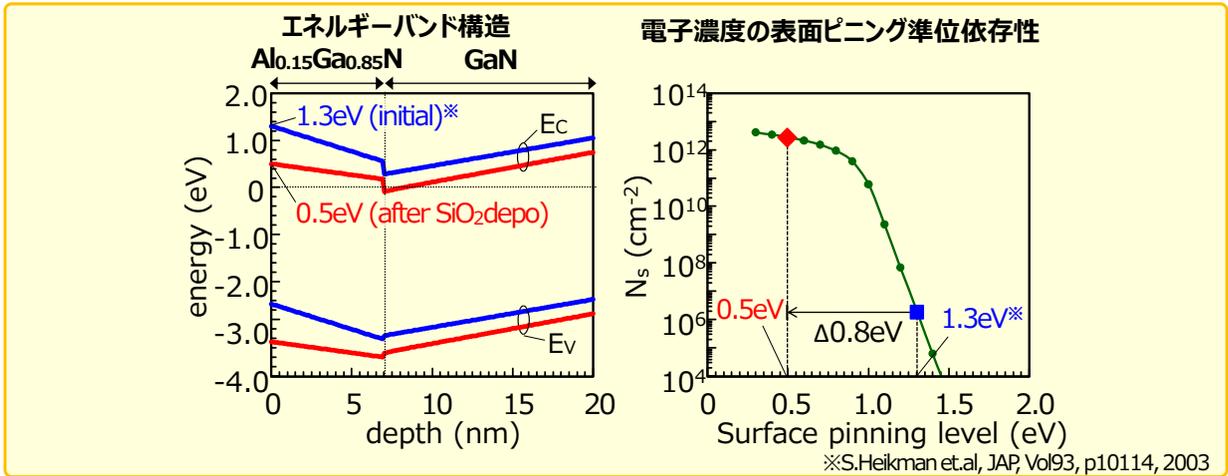
EID膜 (SiO₂) 堆積 : スペクトルが高エネルギー側にシフト (表面ポテンシャルの減少)
800°C アニール : Alのスペクトルが僅かに変化 (Alの結合状態が変化)
➡ 2DEGの誘起/増加に起因している可能性大

HAXPESによるAlGaN表面近傍の電子状態分析



EID膜 (SiO₂) 堆積 : スペクトルが高エネルギー側にシフト (表面ポテンシャルの減少)
800°C アニール : Alのスペクトルが僅かに変化 (Alの結合状態が変化)
➡ 2DEGの誘起/増加に起因している可能性大
BHF浸漬: 初期状態への回復

EID構造におけるI-V特性の変化



※S.Heikman et.al, JAP, Vol93, p10114, 2003

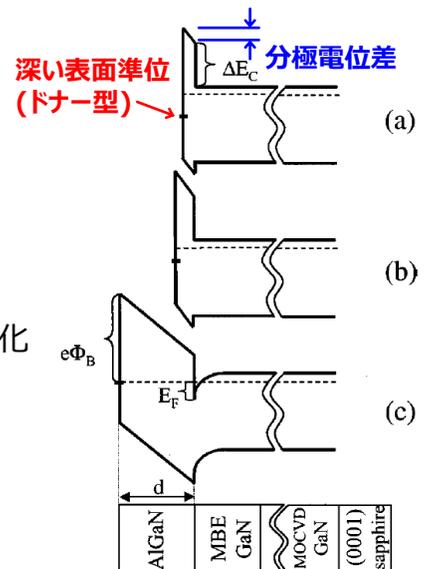
EID膜の堆積による0.8eVのスペクトルシフト → 表面ピンング準位の変化と仮定
 エネルギーバンド構造結果：ヘテロ界面のE_CがE_F以下にシフト → 2DEG誘起を説明可能
 → EID構造による2DEG誘起が表面ピンング準位の変化によって生じていることを実証！

21
© Mitsubishi Electric Corporation

2DEG生成メカニズム ※1

AlGaIn表面ピンング準位が変化する原因

- ① AlGaInバリア層表面準位の形成/消滅
 - AlGaIn表面の結合状態の変化
 - ・Alの結合状態の変化 ← HAXPESにより実証済み
 - ・EID膜 (SiO₂) の成膜条件依存性調査
- ② 分極電位の変化 (分極電荷の増減)
 - EID膜 (SiO₂) 応力によるAlGaIn層の結晶歪の変化
 - ・XRDによるAlGaIn表面の結晶歪評価
 - ・EID膜 (SiO₂) の膜厚依存性調査



EID構造による2DEG制御メカニズム解明
 → 今後も継続調査が必要

※1 Smorchkova et al. J. Appl. Phys., 86, 4520 (1999)
 © Mitsubishi Electric Corporation

まとめ

ドライエッチングフリー（ダメージレス）プロセスで作製可能な
EID AlGa_n/Ga_n MOS-HEMTの提案と動作実証

～ 試作/評価 ～

しきい値電圧0.9V/耐圧1kV以上のEモード動作実証！
将来の高安定性/信頼性パワースイッチング用デバイスとして期待

EID構造における2DEG生成メカニズム調査

< HAXPES分析 >

SiO₂膜堆積による0.5~0.8eVの表面ピンング準位の変化を観測
高温熱処理によるAl1sスペクトルのピークシフトを観測

EID構造による2DEG生成メカニズムの一端を解明
詳細なメカニズム解明には、継続検討が必要
→ EID MOS-HEMT以外の新規デバイス創出にも期待