

GaN-HEMTのバンド構造解析

株式会社富士通研究所

野村 健二、滋野 真弓、土井 修一、
宮島 豊生、淡路 直樹、片岡 祐治

HEMTデバイスの利用

HEMT: High Electron Mobility Transistor

高周波(高速)デバイス



航空機・気象レーダー

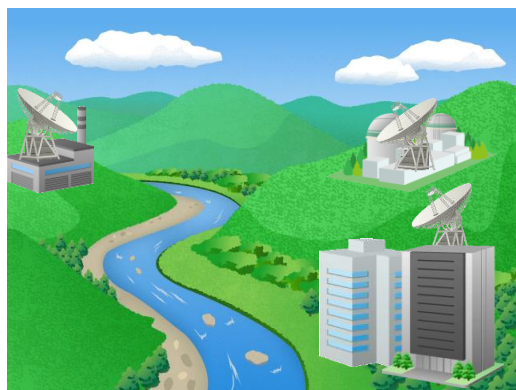


携帯電話基地局

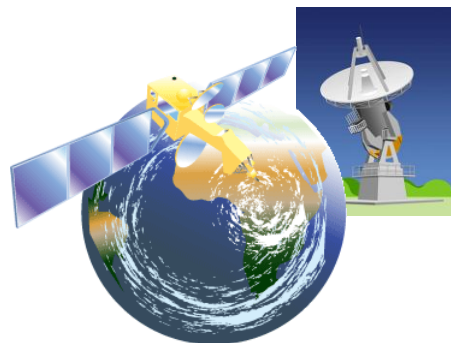
パワー(高耐圧)デバイス



電気自動車・ハイブリッドカー



ワイヤレス通信



衛星通信



インバータ搭載電気機器

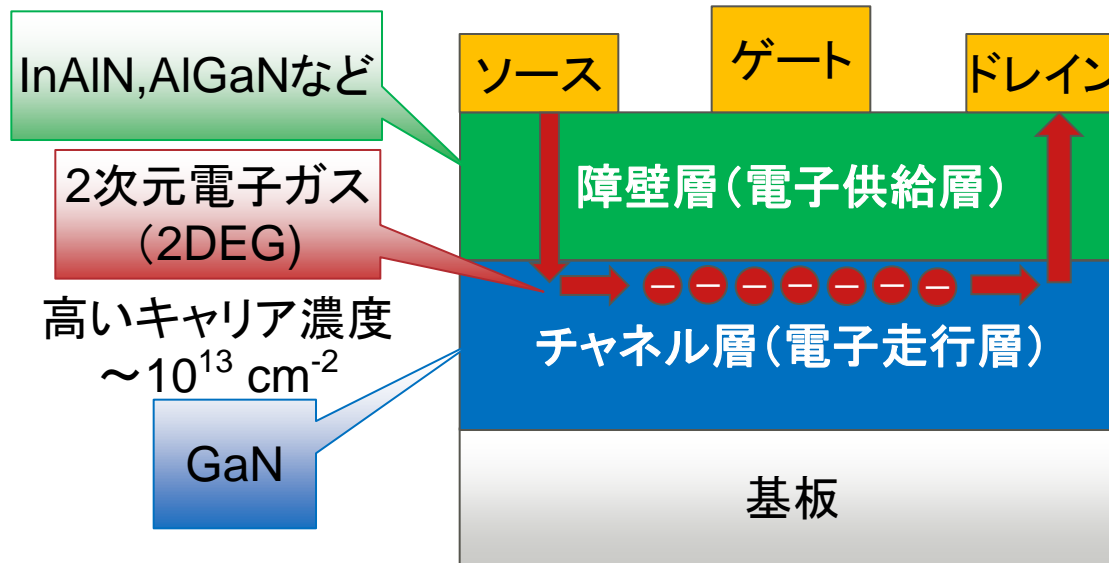
- ・1980年に富士通/富士通研究所により開発
- ・社会インフラを支える様々な高周波/パワーデバイスに利用が拡大

窒化ガリウム(GaN)の物性とGaN-HEMT

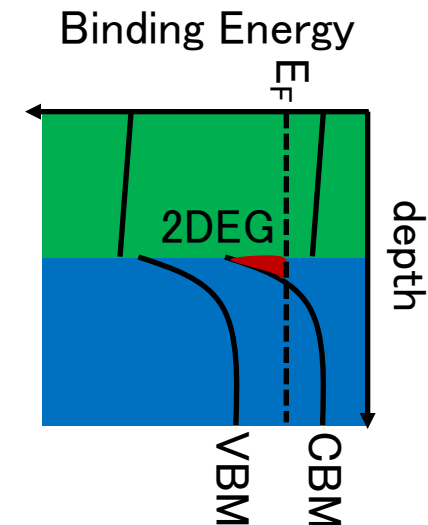
窒化ガリウム(GaN)の物性

材料	破壊電界 (MV/cm)	飽和電子速度 (cm/s)	移動度 (cm ² /Vs)	熱伝導率 (W/cm/K)
Si	0.3	1.0×10^{12}	1350~1500	1.3~2.0
GaAs	0.4	2.0×10^{12}	8500	0.5~0.6
SiC	2.8~3.0	2.0×10^{12}	650~1020	4.5~5.0
GaN	3.3	2.5×10^{12}	900~2000	1.0~2.1

GaN-HEMTの基本構造

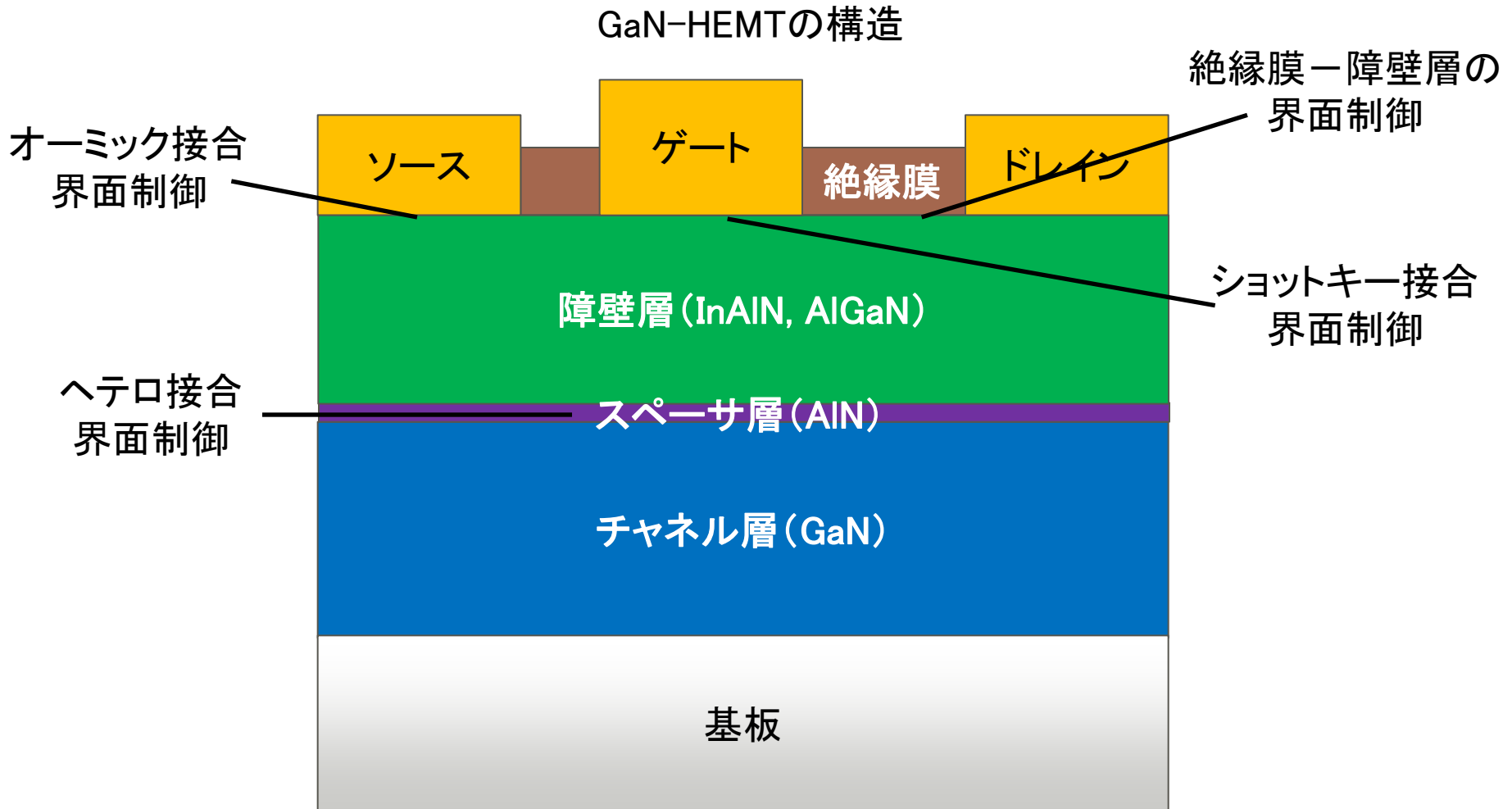


バンド構造



- ・GaNの高い電子飽和速度、絶縁破壊電界とHEMT特有の高キャリア濃度の2DEGにより高速、高耐圧デバイスを実現

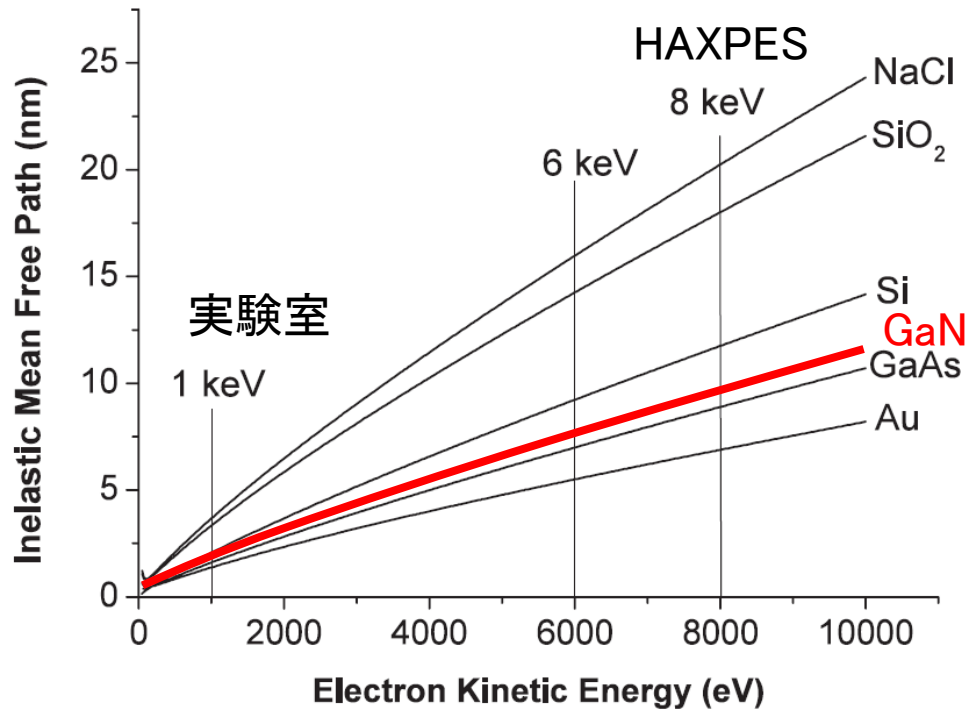
フェルミエネルギー(E_F), 価電子帯上端(VBM), 伝導帯下端(CBM)



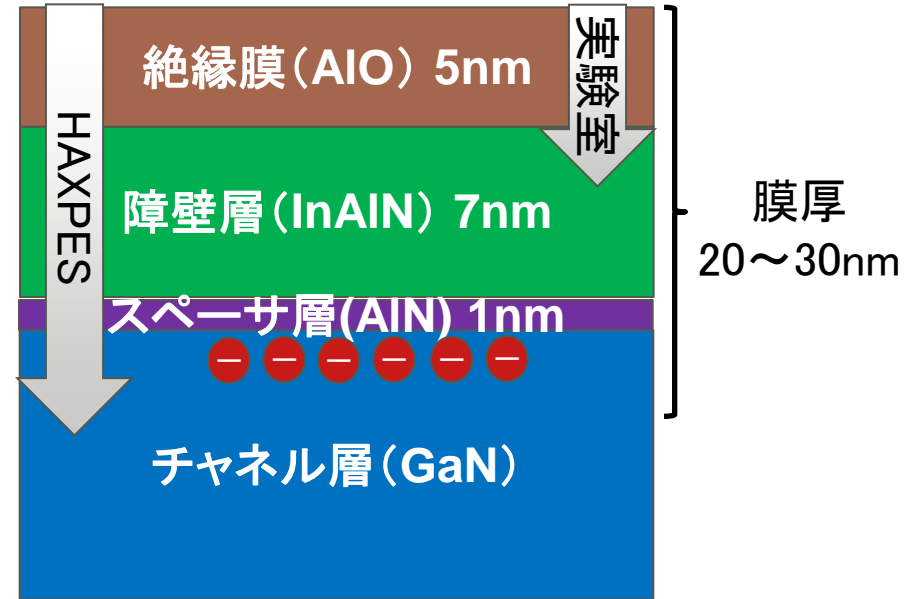
- ・界面準位の影響によりバンド構造が変わりデバイス特性が変化
- ・現状ではデバイス特性を基にバンド構造を推測

硬X線光電子分光の特徴とGaN-HEMTへの適用 FUJITSU

非弾性散乱平均自由行(IMFP)と
運動エネルギーの関係



実験室XPSとHAXPESの検出深さ



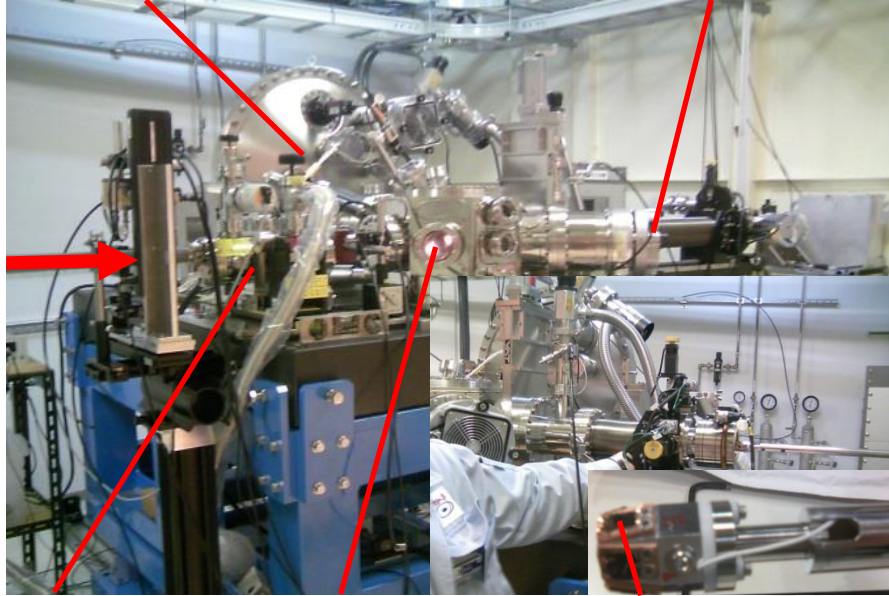
GaNのIMFP
 実験室 約 2 nm 検出可能な深さは
 HAXPES 約 10 nm IMFPの3倍程度

- ・硬X線光電子分光(HAXPES)の検出深さを利用することで、
 実デバイスに近いGaN-HEMTのヘテロ接合界面を含めた
 バンド構造評価技術開発を目的とする

HAXPES装置

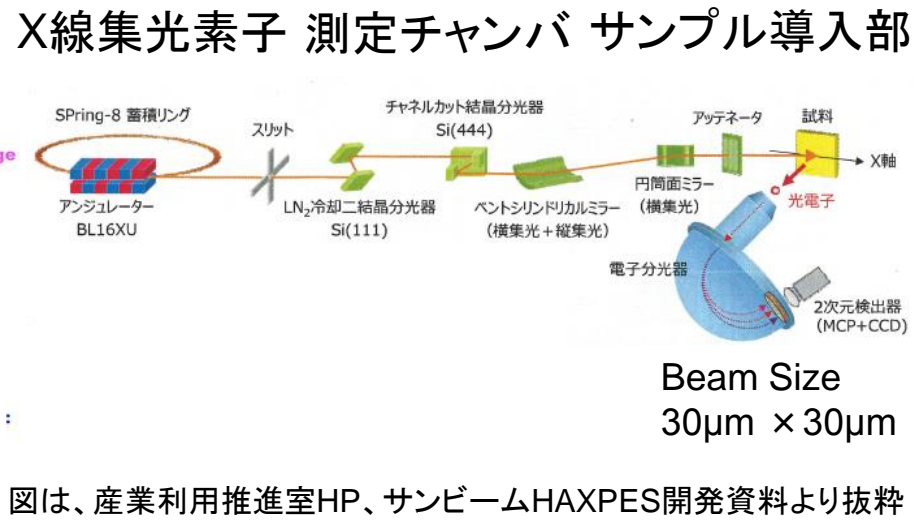
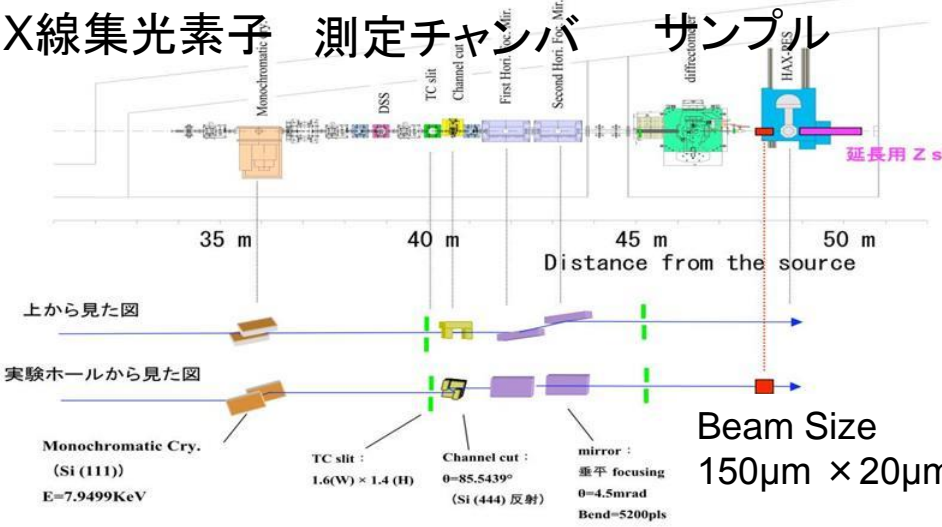
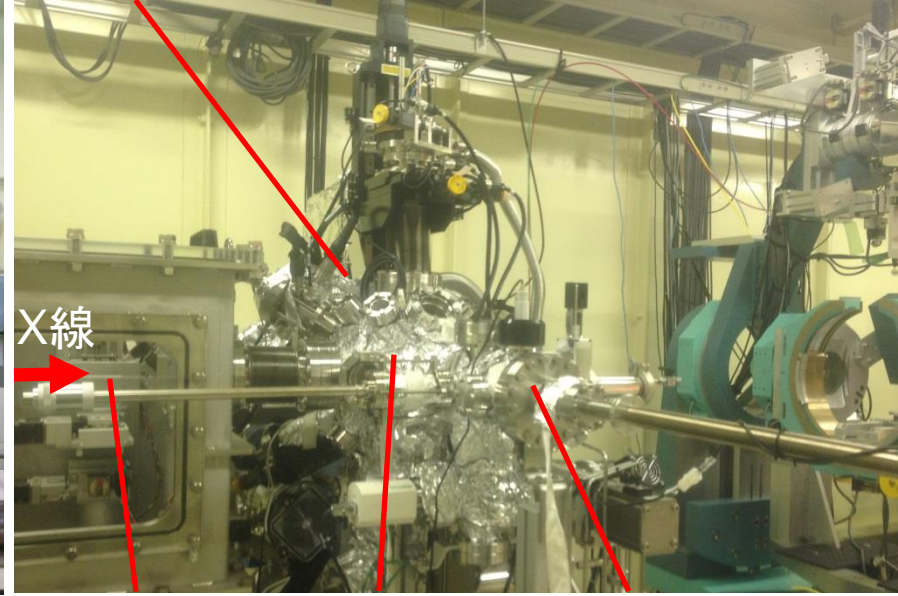
BL46XU(共用ビームライン)

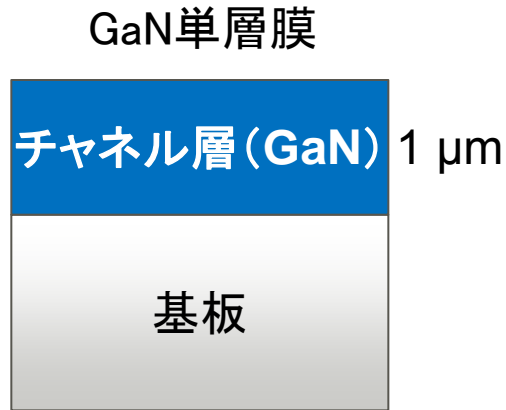
アナライザ: SCIENTA製R4000 サンプル導入部



BL16XU(専用ビームライン)

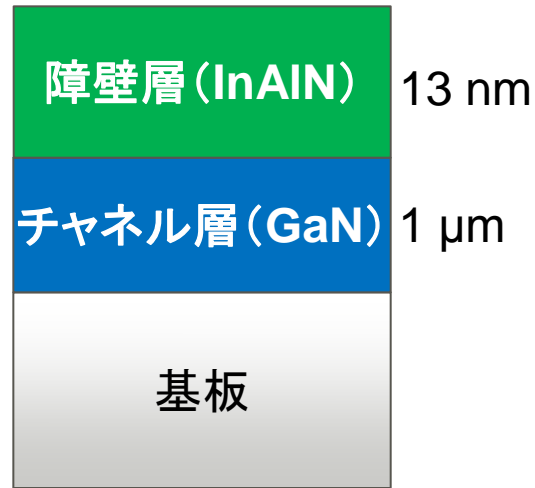
アナライザ: SCIENTA製R4000





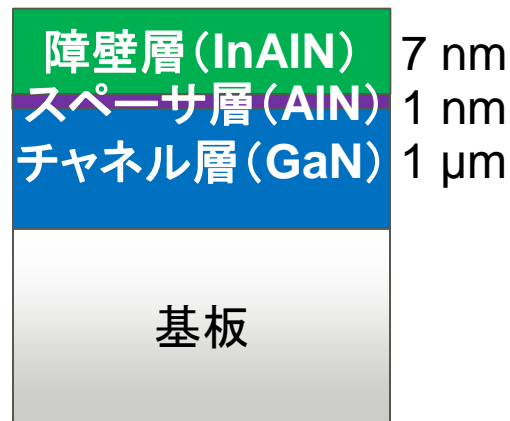
p-GaN(Mg: $4E+19 \text{ cm}^{-3}$)
 p-GaN(Mg: $2E+19 \text{ cm}^{-3}$)
 i-GaN
 n-GaN(Si: $2E+18 \text{ cm}^{-3}$)

HEMT基本構造

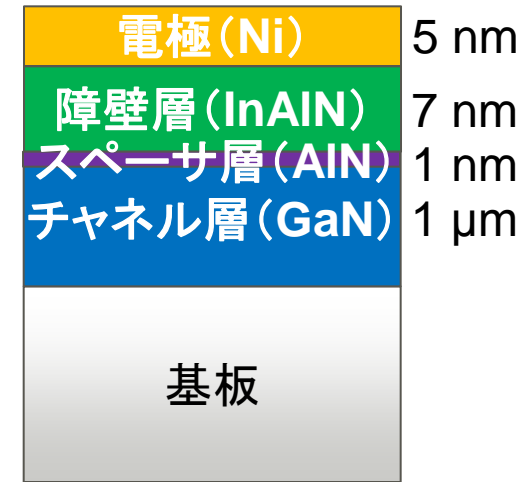


$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$
 $x=17, 32\%$

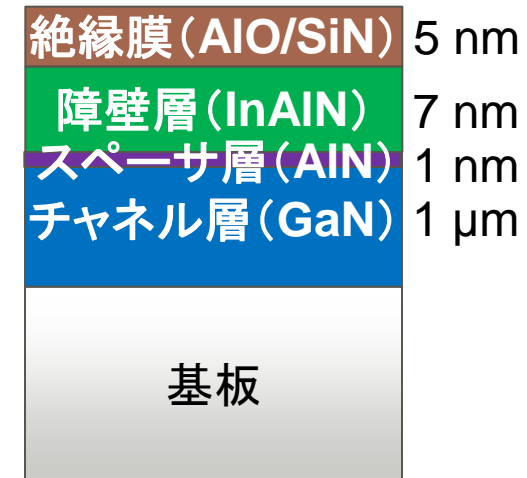
スペーサーの挿入



電極形成

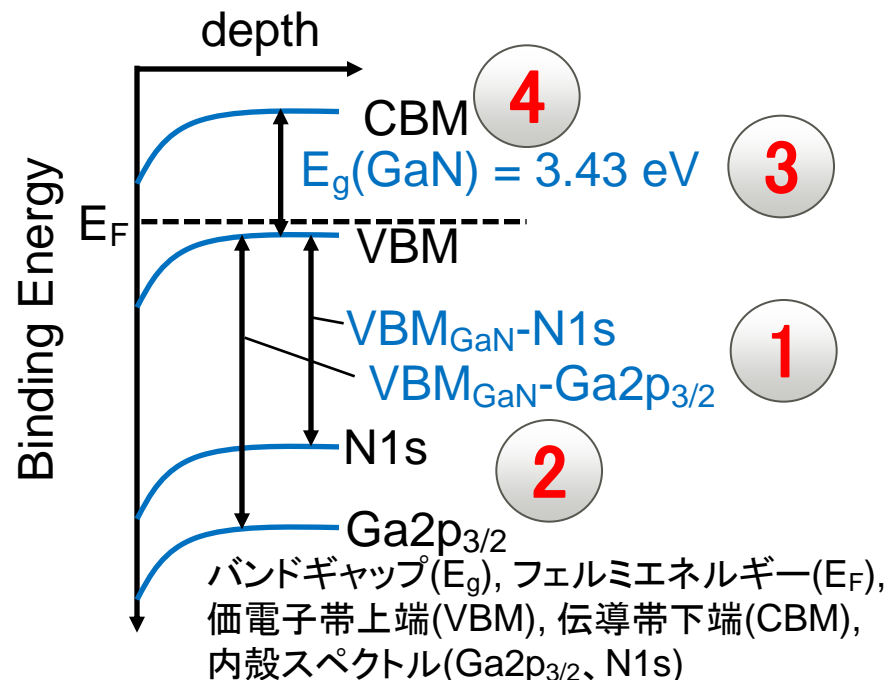


絶縁膜形成



・評価技術開発に必要な
 10試料を準備

バンド構造解析方法(GaN単層膜)

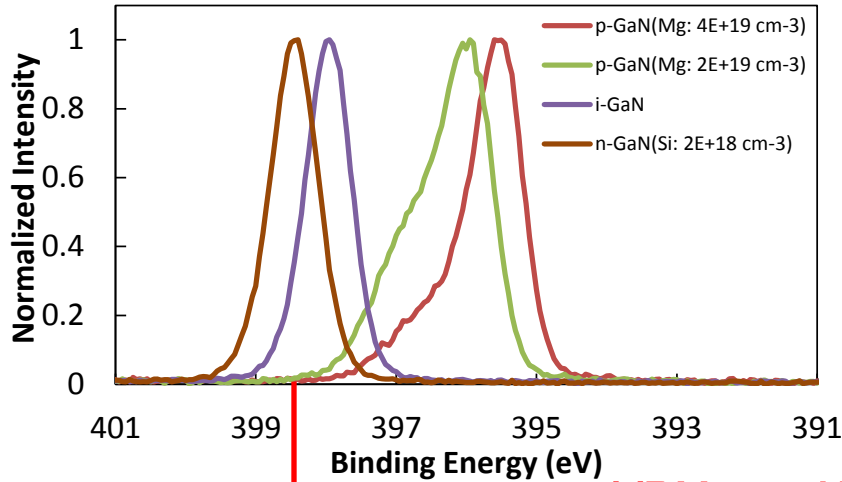


解析方法

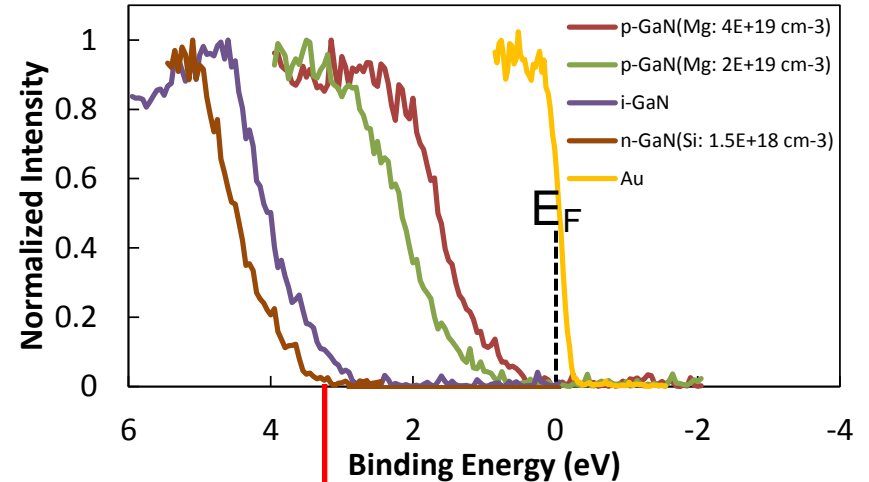
- Step① 価電子帯スペクトルと内殻スペクトルを測定
⇒ 「 VBM_{GaN} - 内殻」を導出しデータベース化
- Step② 内殻スペクトルN1s、 $\text{Ga2p}_{3/2}$ を測定
⇒ VBMの深さ依存を導出
- Step③ ロススペクトルの測定
⇒ バンドギャップ $E_g(\text{GaN})$ を導出
- Step④ ⇒ VBM深さ依存とバンドギャップよりCBM深さ依存を導出

Step① 「VBM_{GaN}-内殻」のデータベース化

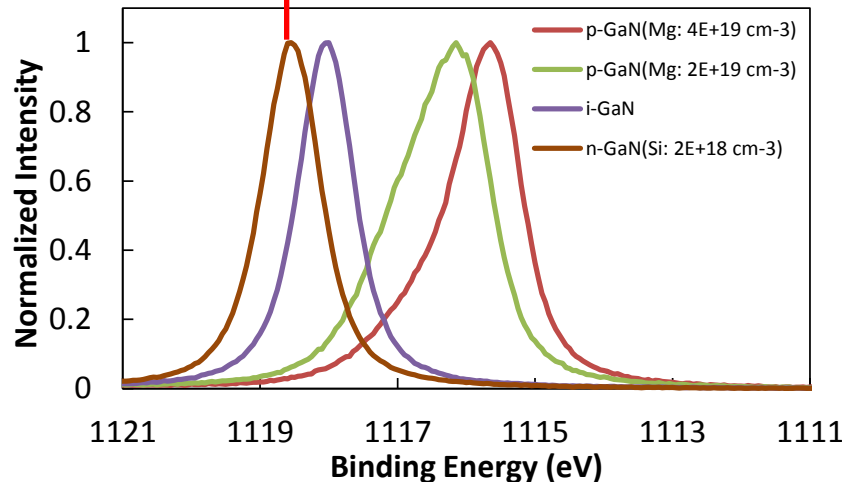
内殻N1sスペクトル



価電子帯スペクトル



内殻Ga2p_{3/2}スペクトル



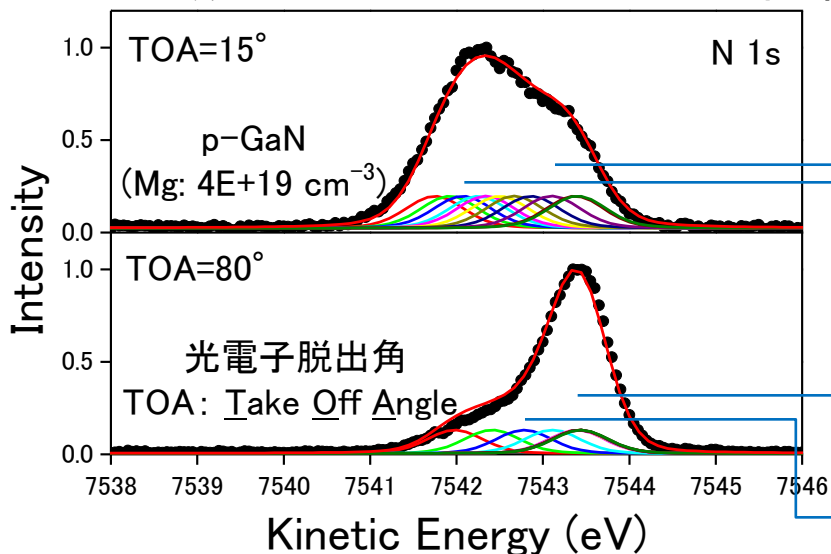
E_FとVBMの位置関係が変化すると
それに応じて内殻(N1s、Ga2p_{3/2})もシフト



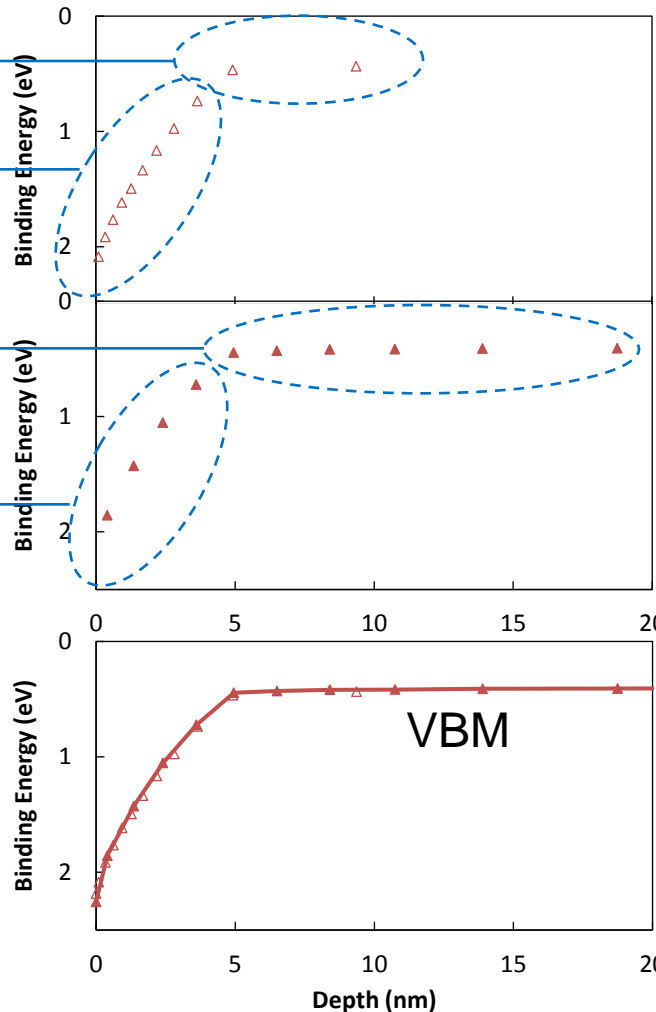
- ・「VBM_{GaN}-内殻」が分かっているれば
- 内殻の測定からVBMを導出可
- どの内殻を用いてもVBM導出可

Step② VBMの深さ依存の導出

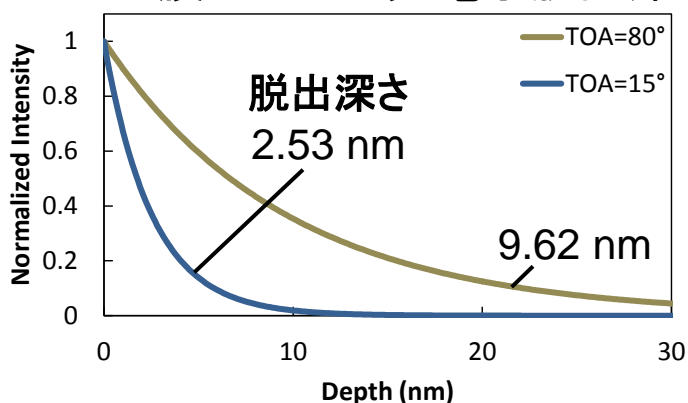
N1s内殻スペクトルのピークフィット結果



フィットにより得られたVBMの深さ依存



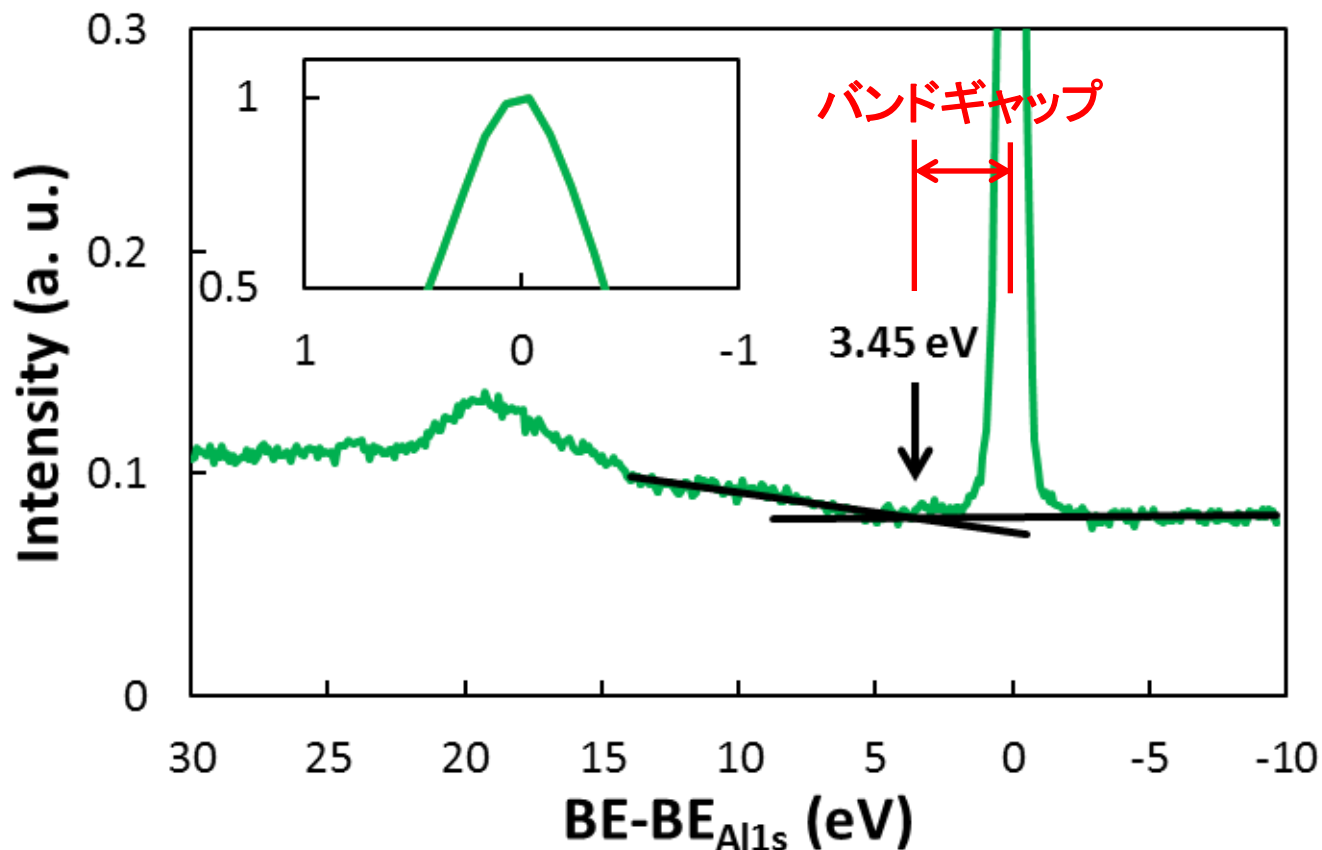
GaN膜のN1sの光電子脱出深さ



- ・深さ毎に異なるピーク位置としてフィットしVBMの深さ依存を導出
- ・異なるTOAで測定したスペクトルの同時解析により解析精度向上

Step③ バンドギャップの導出

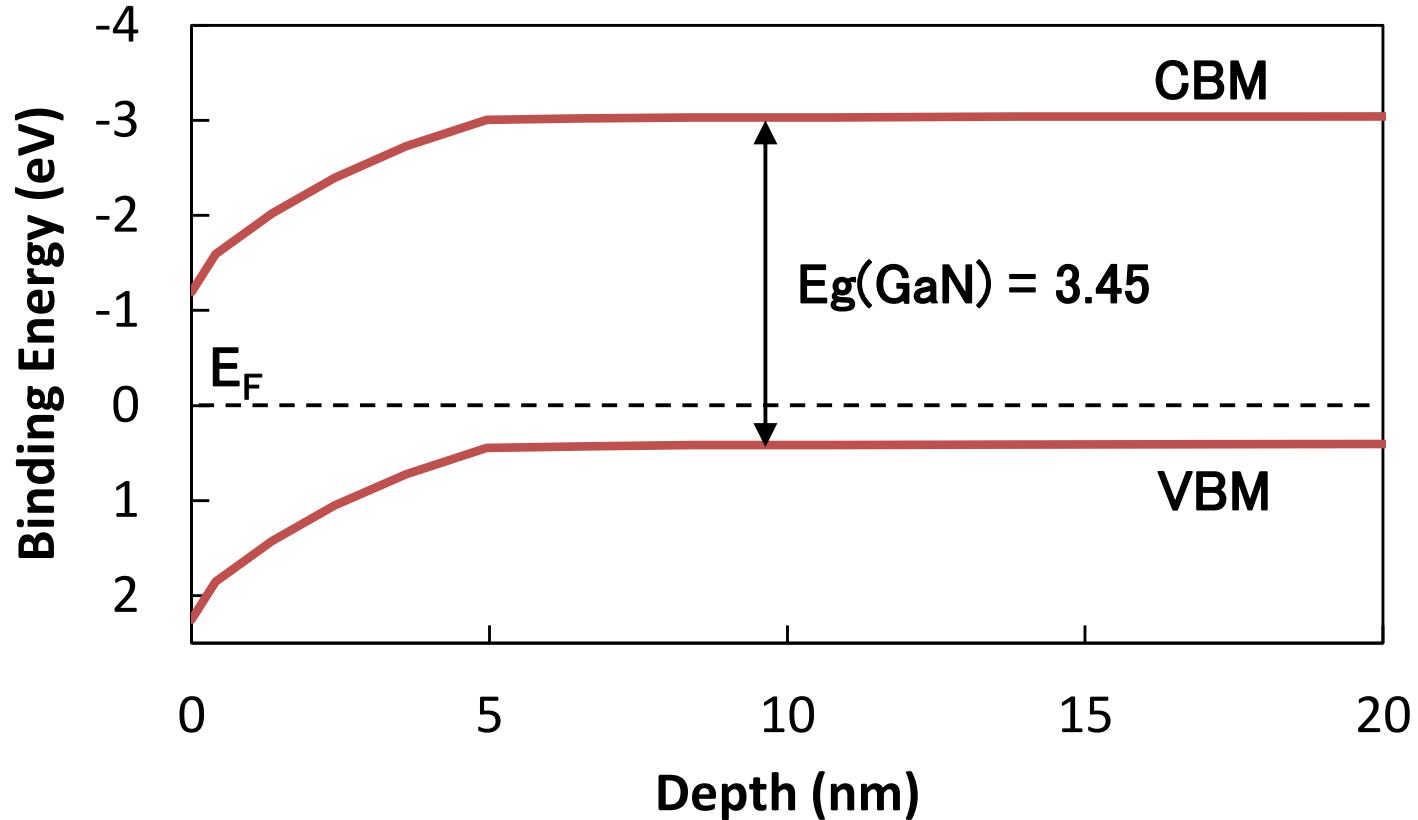
ロススペクトル測定



・ロススペクトル測定より、バンドギャップを導出

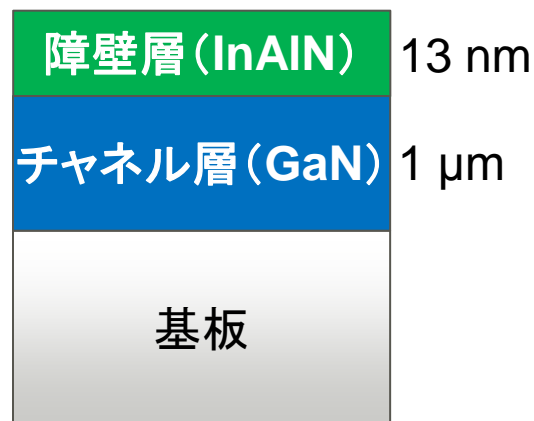
Step④ CBMの深さ依存の導出

GaN単層膜のバンド構造解析結果



- ・ Step②で導出したVBMの深さ依存と、Step③で導出したバンドギャップを使用して、CBMの深さ依存を導出

内殻スペクトルの選定



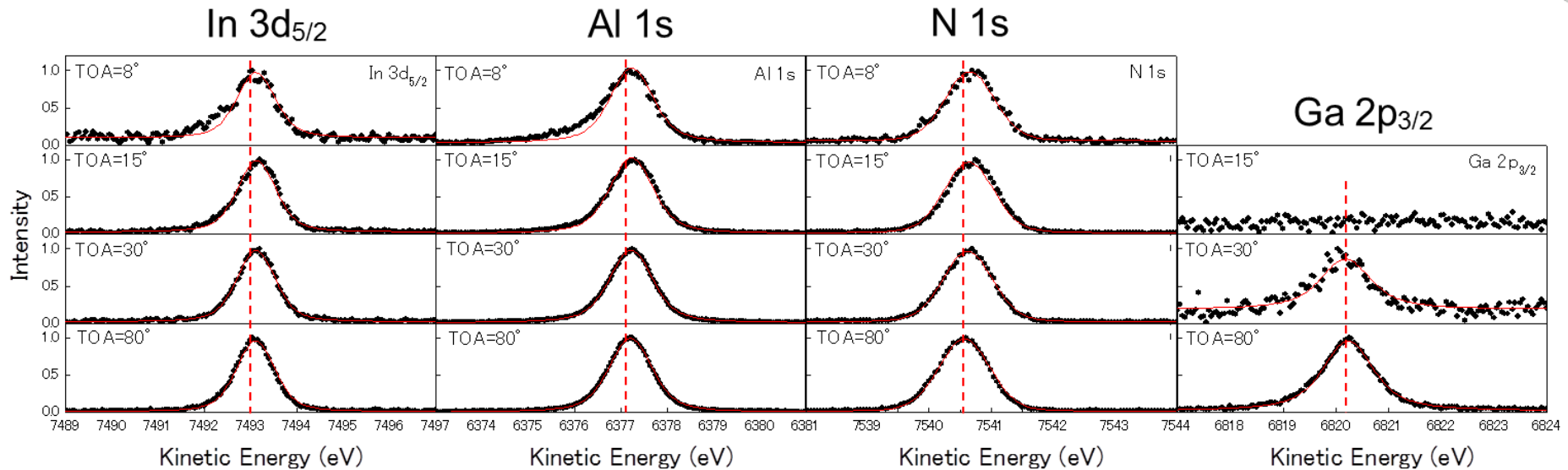
膜	内殻スペクトル			
InAlN	In3d _{5/2}	Al1s	—	N1s
GaN	—	—	Ga2p _{3/2}	N1s

InAlNのみ GaNのみ 両方

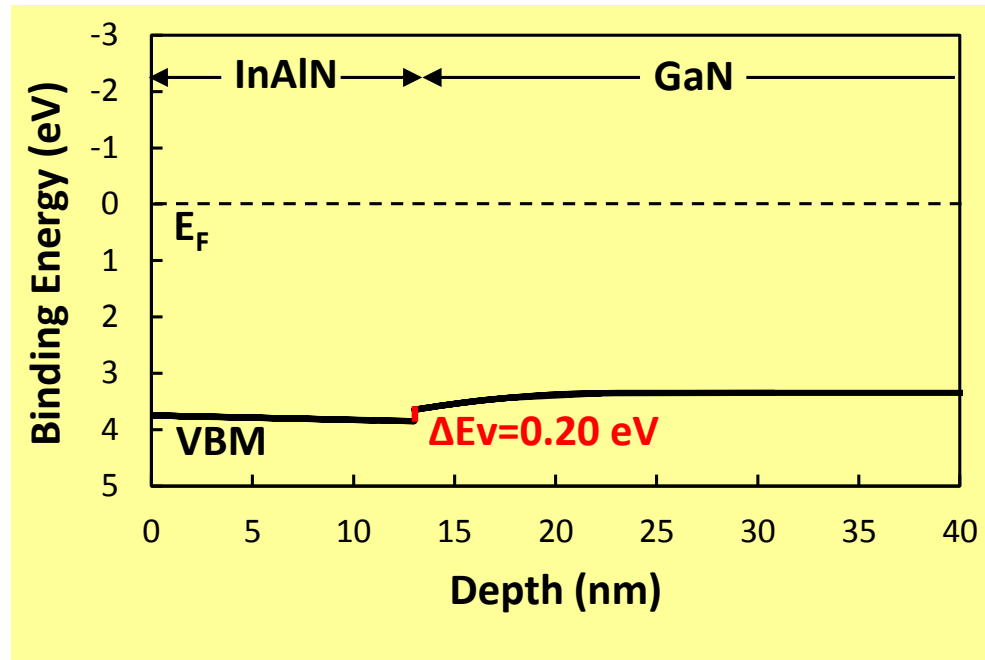
In3d_{5/2}: ピーク幅小
 Al1s: 強度大

- ・どの内殻ピークを選択してもVBMの導出が可能な特徴を利用し、多層膜のバンド構造を解析
- ・InAlNのみに起因するIn3d_{5/2}、Al1s、GaNのみに起因するGa2p_{3/2}、両方に起因するN1sを選択
- ・ピークのエネルギー幅が狭いIn3d_{5/2}と強度が強いAl1sの併用により解析精度向上

InAlN / GaNにおけるVBMの解析結果

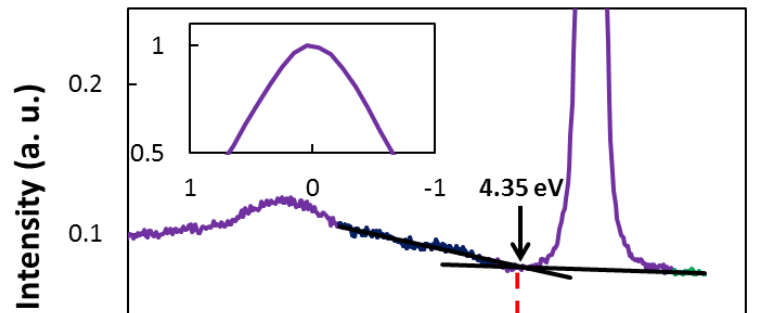


- ・VBMの導出により得た、
バンド不連続 $\Delta E_v = 0.20 \text{ eV}$ は
シミュレーションと略一致
(J. Cryst. Growth 269, 119 (2004).)

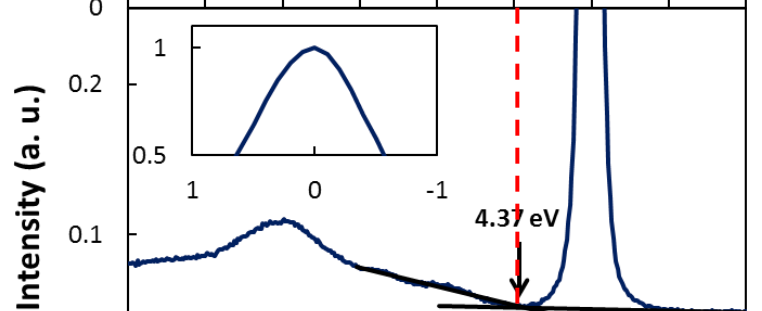


InAlNのバンドギャップの解析結果

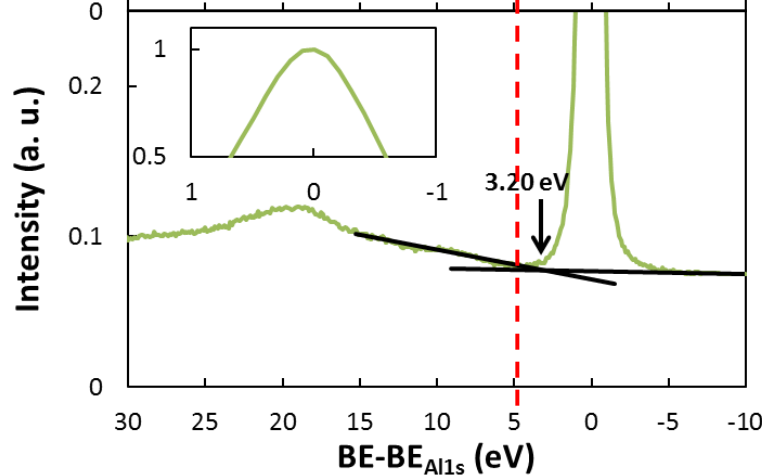
In 17%
膜厚 7nm



In 17%
膜厚 13nm



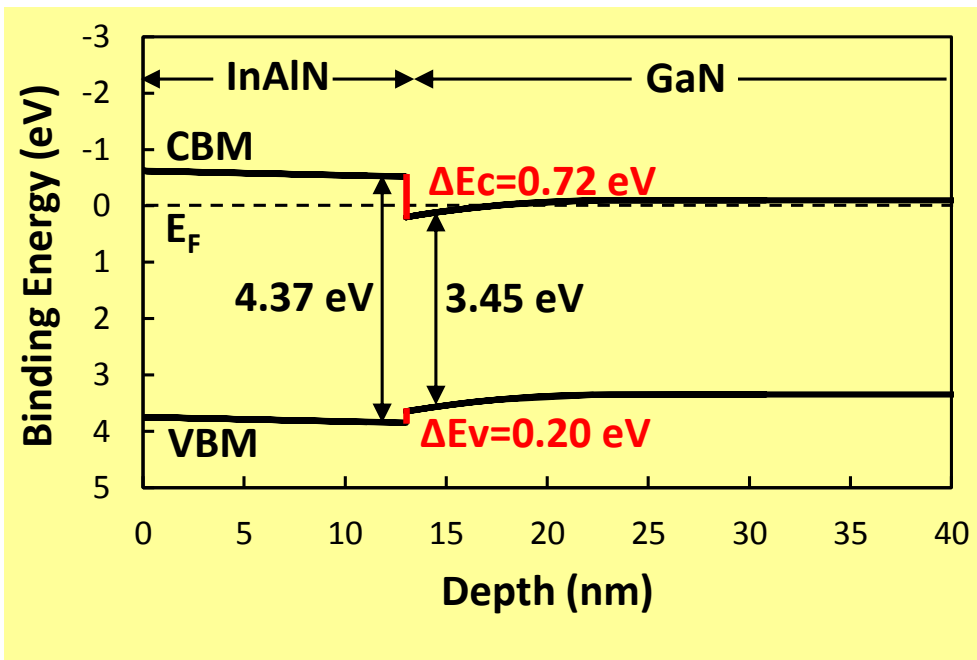
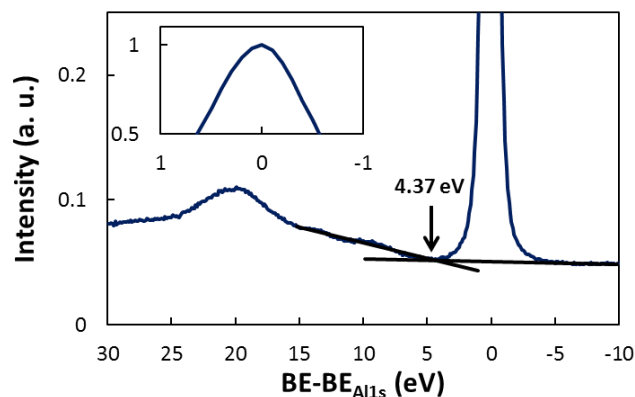
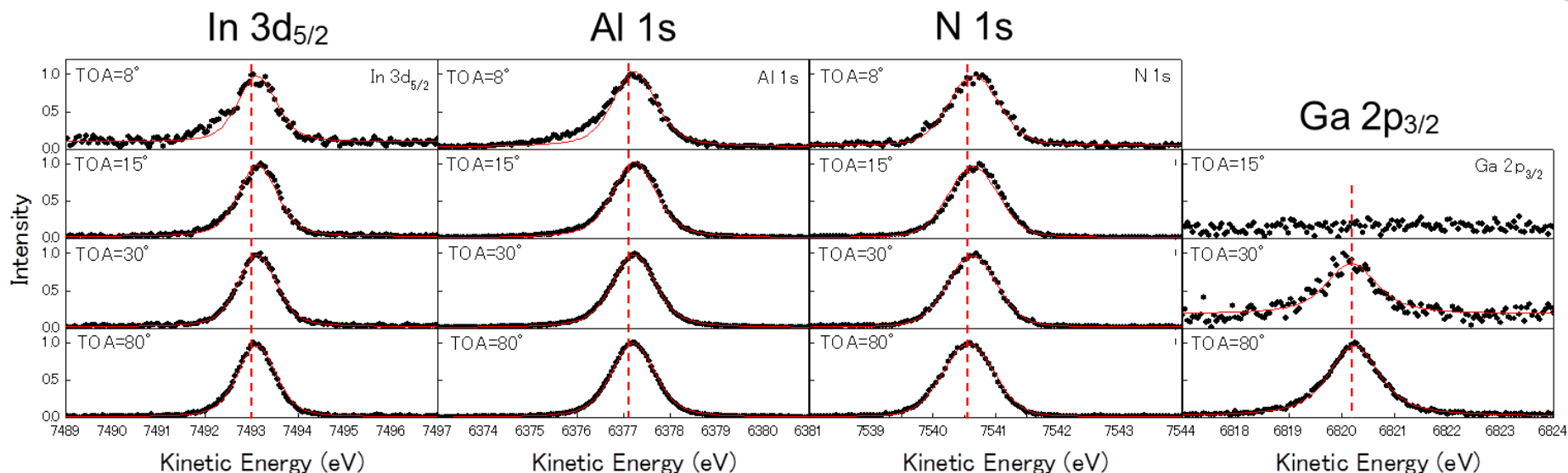
In 32%



解析結果

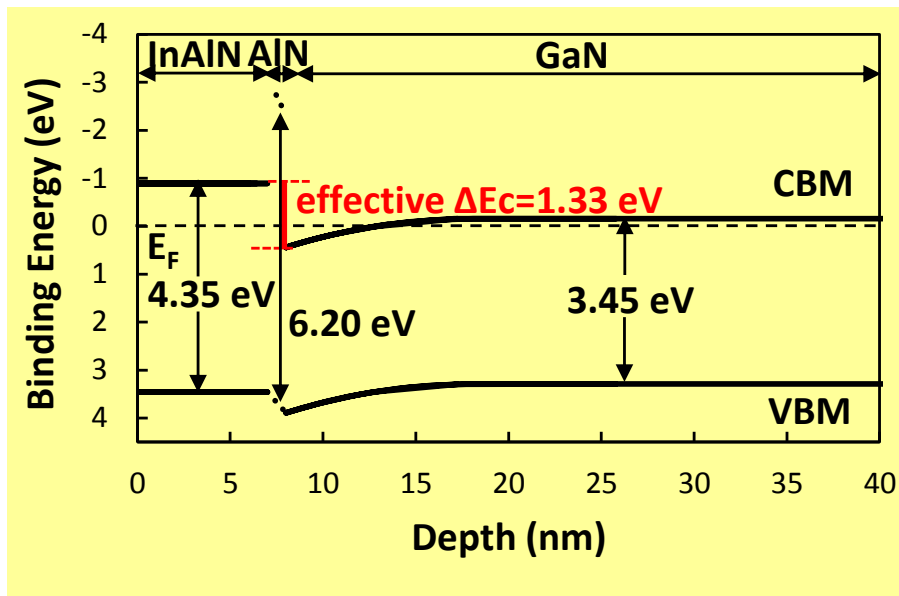
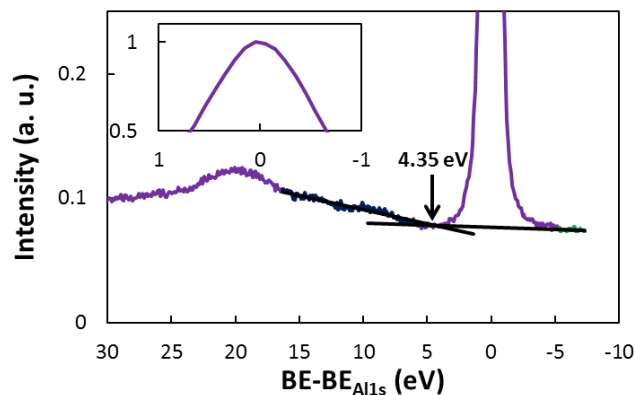
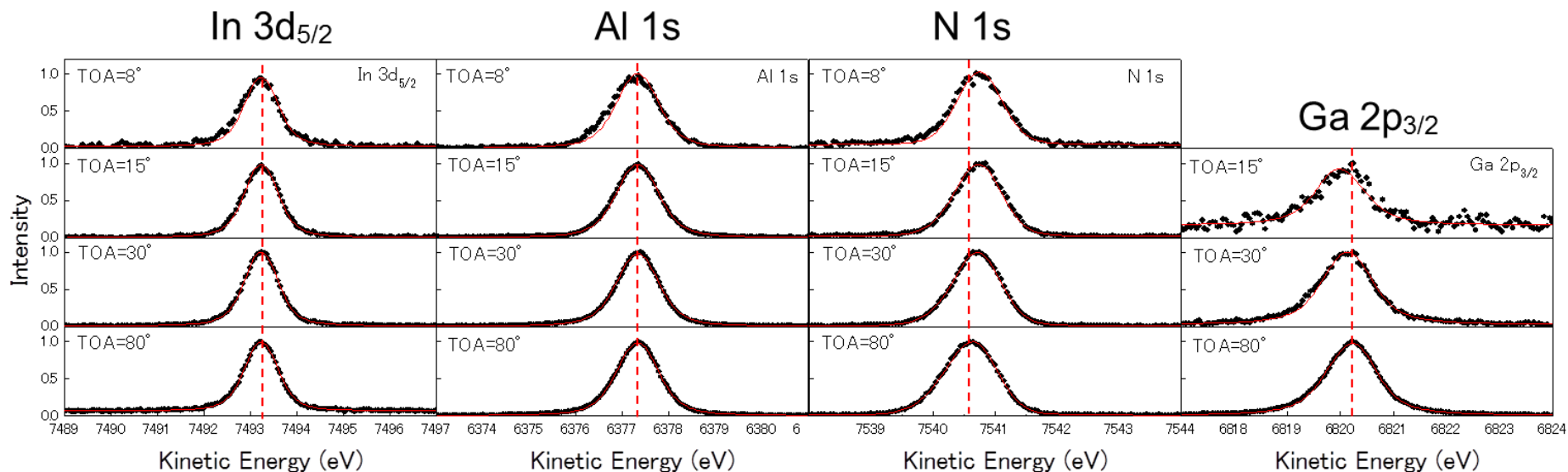
膜種		膜厚	バンドギャップ
障壁層 InAlN	In 17%	7 nm	4.35 eV
	In 17%	13 nm	4.37 eV
In 32%		-	3.20 eV

- ・膜厚でほぼ変化なし
- ・In組成増加に伴い減少



▪ InAlN/GaN-HEMTの
ヘテロ接合界面を含めた
バンド構造解析に成功

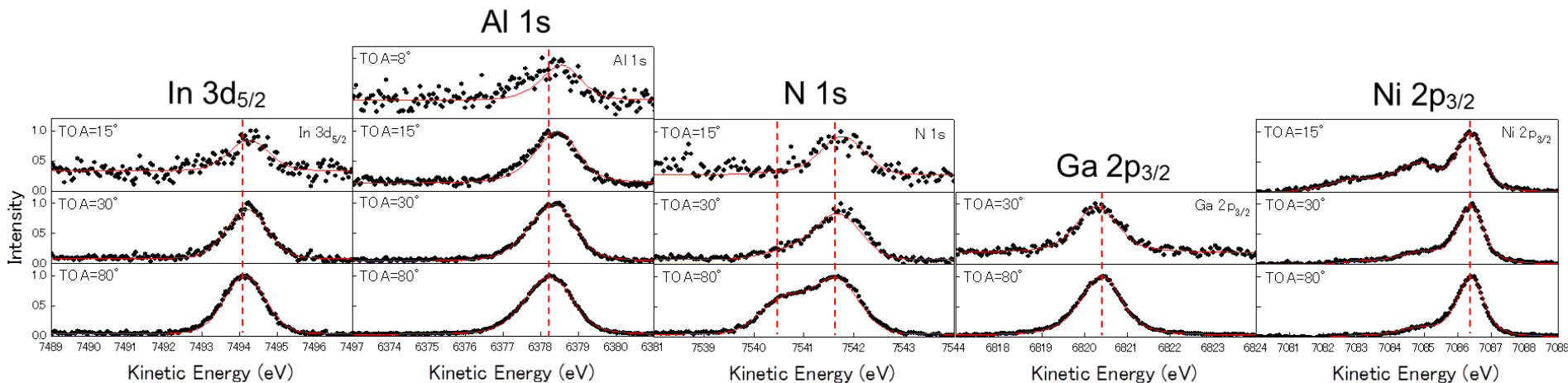
InAlN / AlN / GaNの解析結果



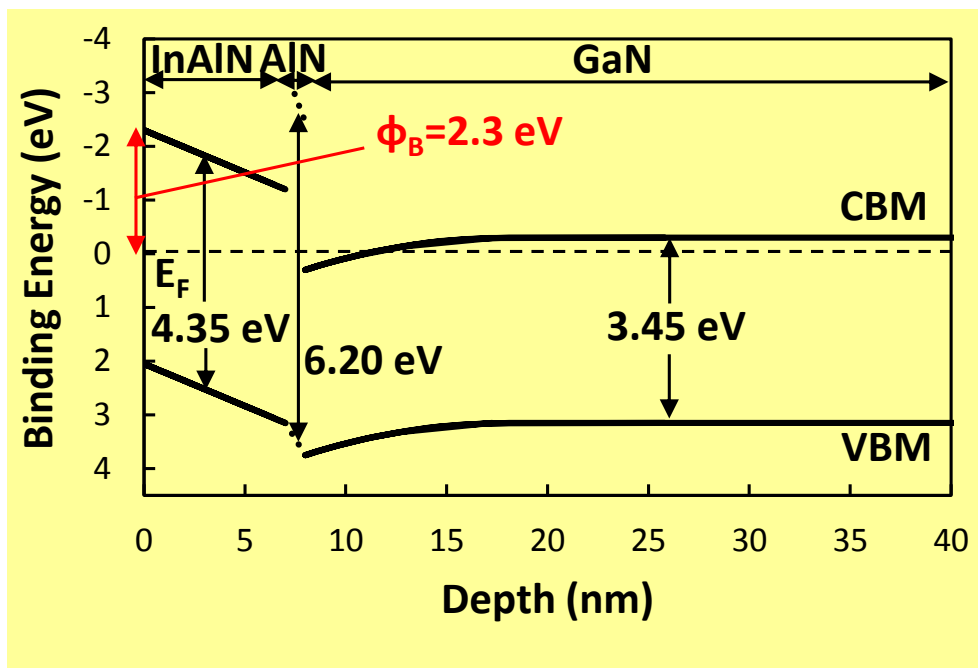
・AlN(1nm)スペーサの挿入により、
effective ΔE_c の増加を観測

⇒ InAlN層への電子のしみ出しを抑制し、2DEG移動度の増加を示唆

Ni / InAlN / AlN / GaNの解析結果



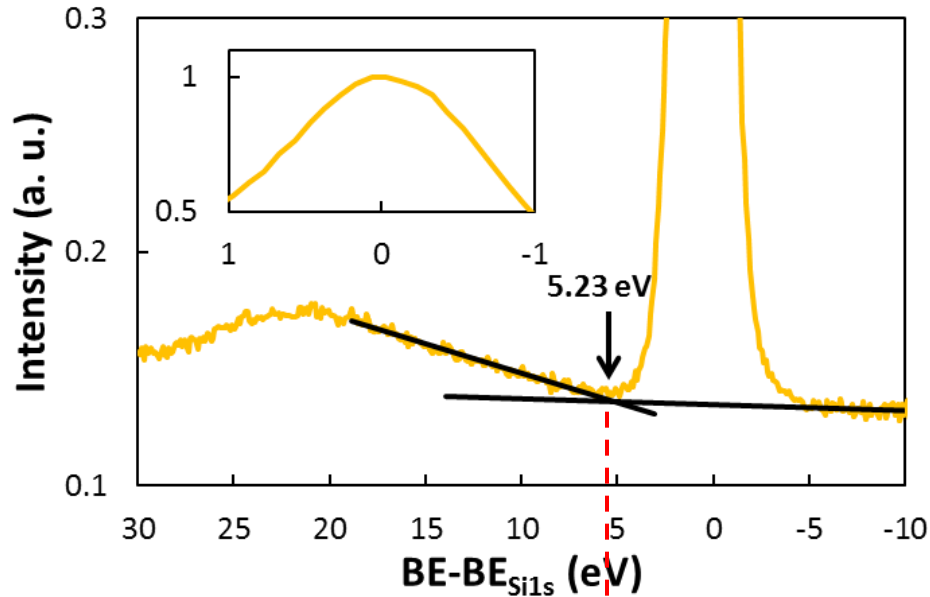
- ・Ni電極形成によりショットキー障壁は $\phi_B=2.3\text{eV}$ に増加
- ・ $\phi_{\text{Ni}}=5.2\text{eV}$ 、 $\chi_{\text{InAlN}}=2.7\text{eV}$ から予想される $\phi_B=5.2-2.7=2.5\text{eV}$ と略一致



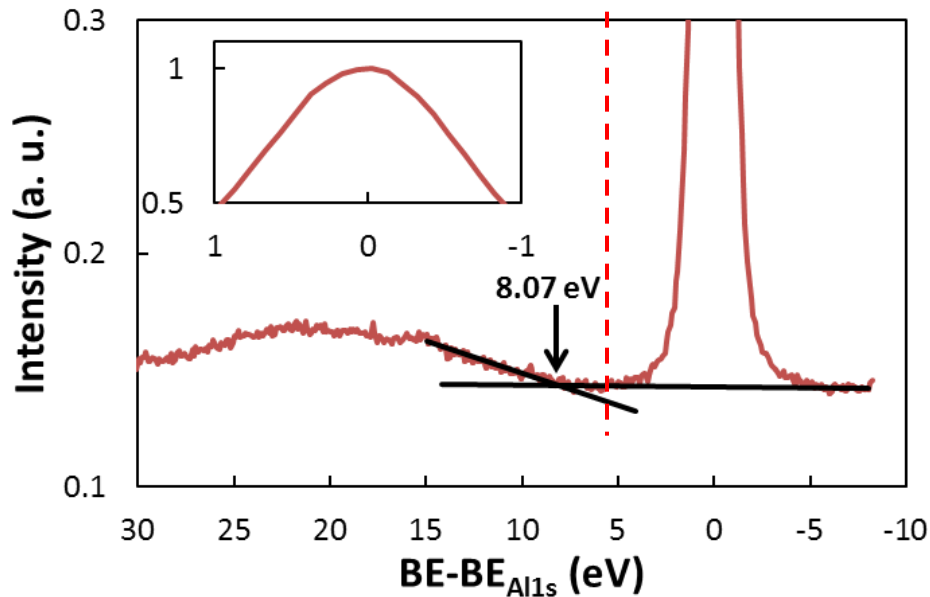
ϕ_m : 仕事関数, χ : 電子親和力, ϕ_B : ショットキー障壁

絶縁膜のバンドギャップの解析結果

SiN膜



AIO膜

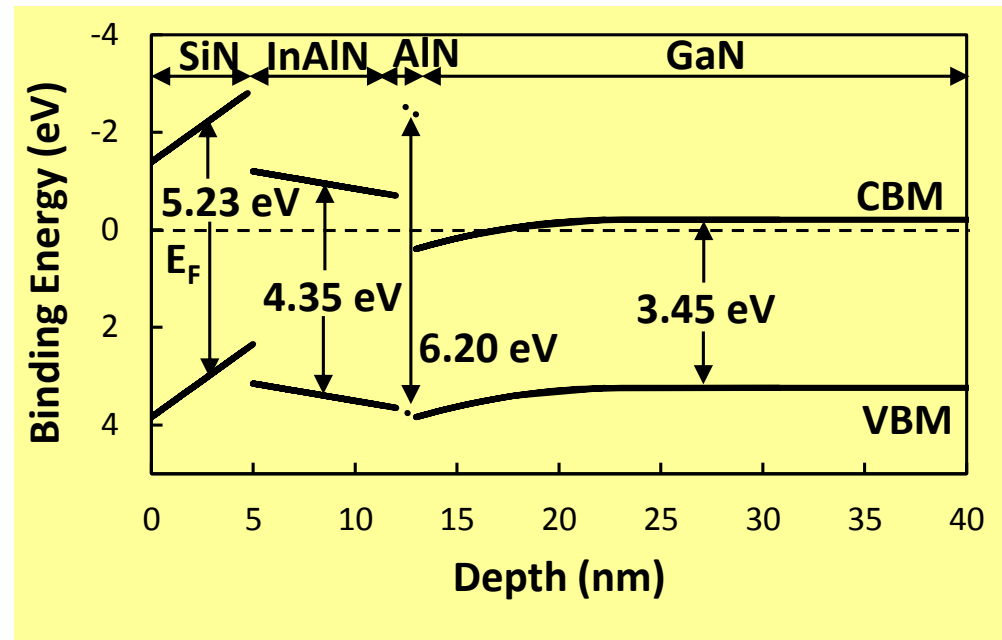
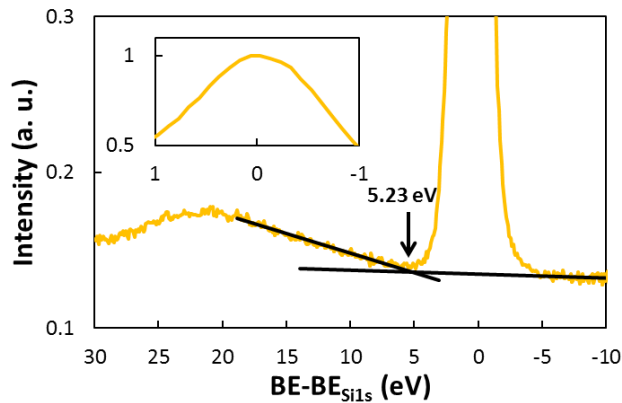
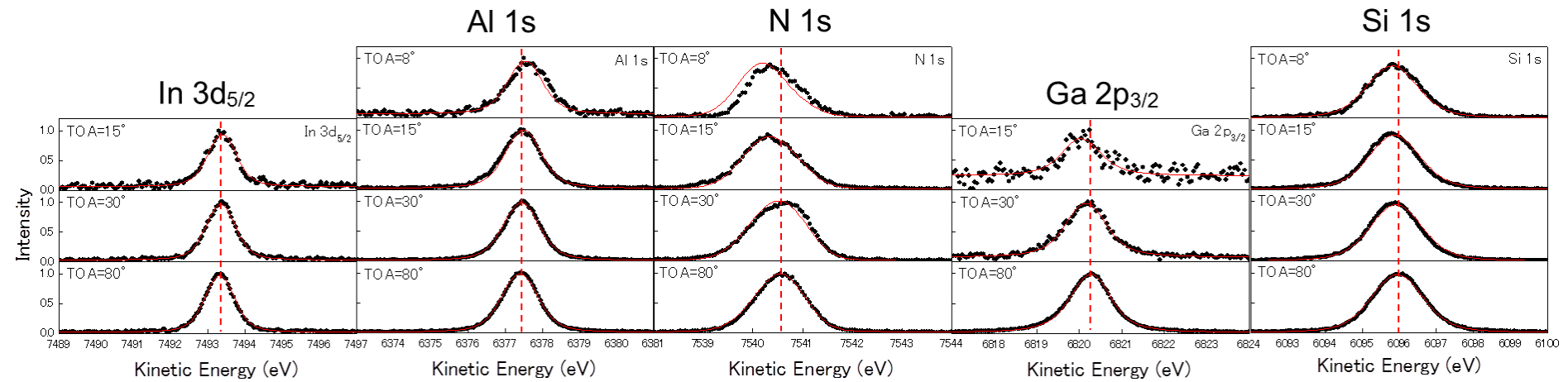


解析結果

膜種		膜厚	バンドギャップ
絶縁膜	SiN	5 nm	5.23 eV
	AIO		8.07 eV

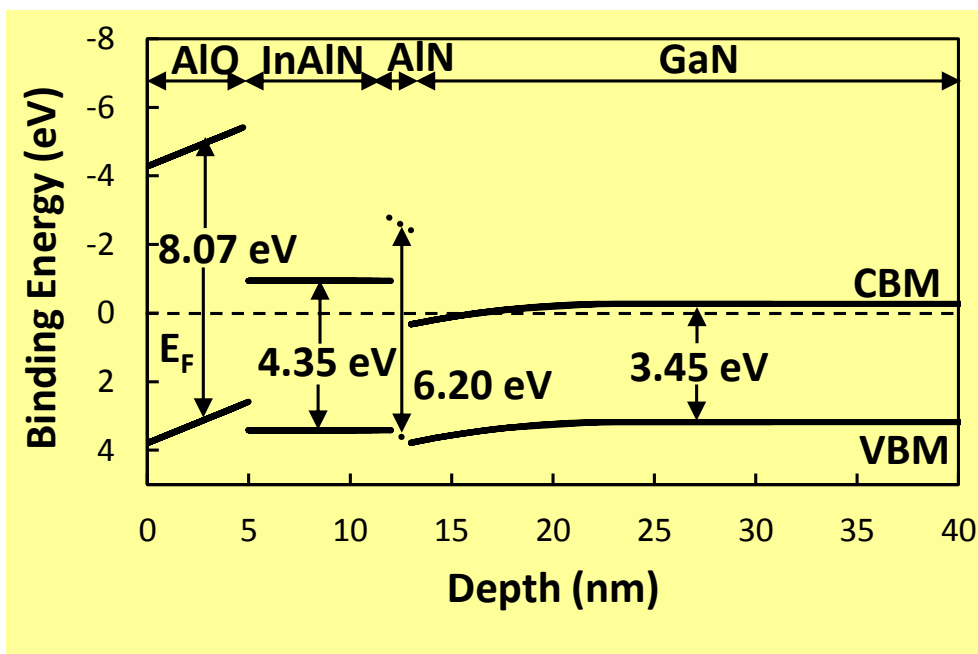
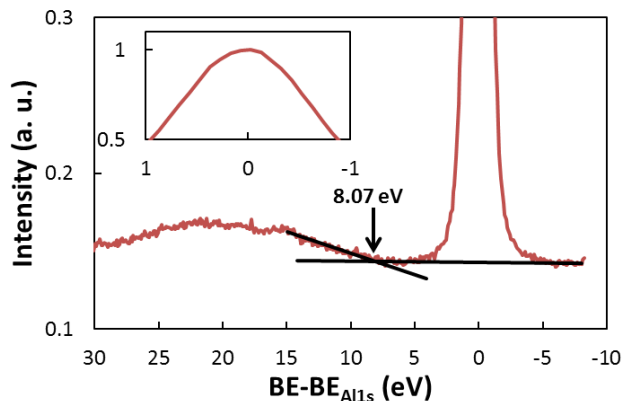
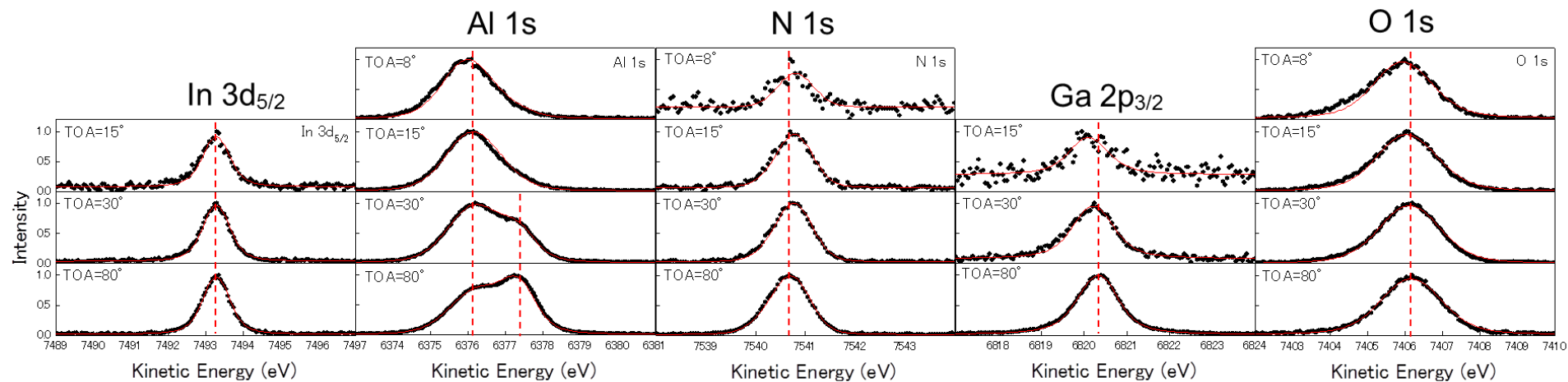
・AIO膜で、より大きなバンドギャップを観測

SiN / InAlN / AlN / GaNの解析結果

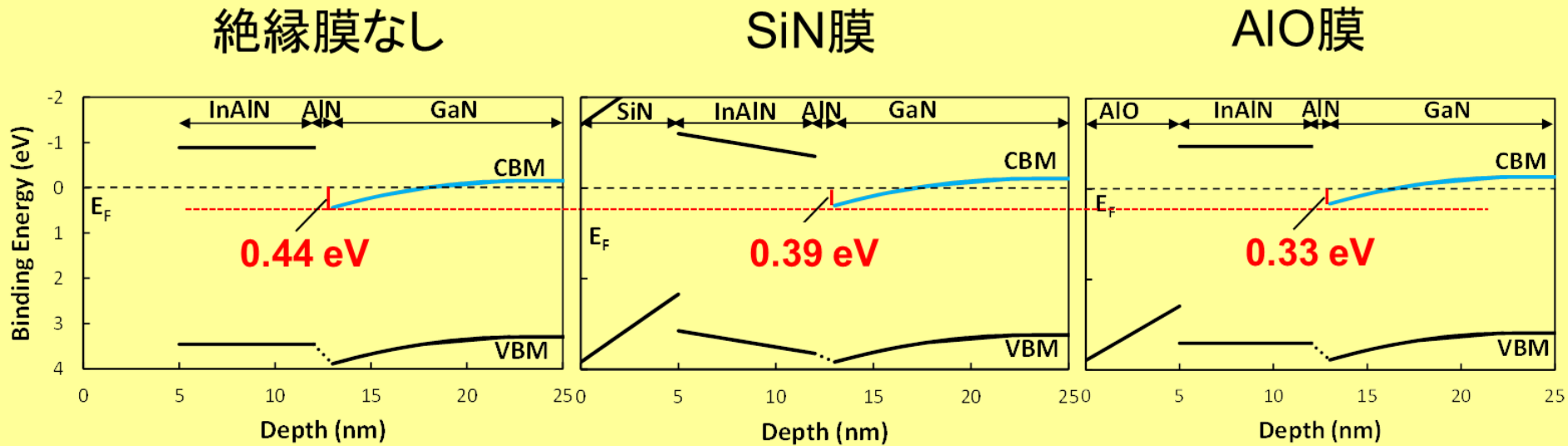


・絶縁膜SiN膜形成後も、
バンド構造の導出が可能

AIO / InAlN / AlN / GaNの解析結果



・絶縁膜AIO膜形成後も、
バンド構造の導出が可能

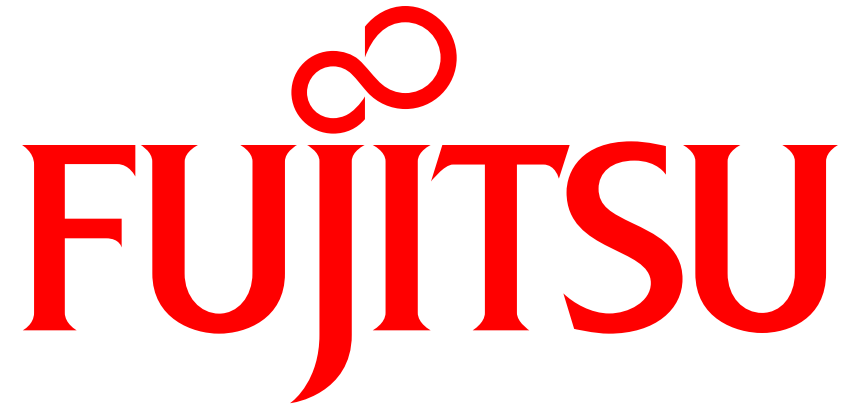


- 絶縁膜によりチャネル部の電位 (GaNのCBM) の持ち上がりを観測
⇒ 2次元電子ガスの減少を示唆
- SiN膜よりもAlO膜の方が効果大

- 硬X線光電子分光の観測深さを利用し、各層の構成元素に起因する複数の内殻スペクトルを同時解析することで、InAlN/GaN-HEMTのバンド構造解析に成功した。
- 本手法を電極や絶縁膜形成後のより実デバイスに近い膜にも適用可能なことを示した。

謝辞

本課題の実施にあたり、JASRI 産業利用推進室 室長 広沢一郎様、コーディネーター 古宮聰様、BL46XUご担当の陰地宏様、孫珍永様、崔芸涛様には大変お世話になり、感謝しております。



shaping tomorrow with you