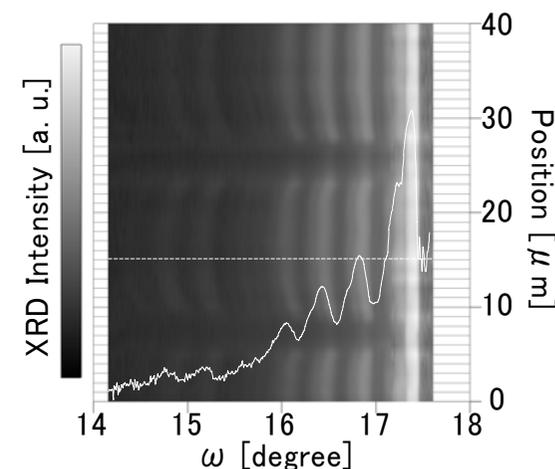
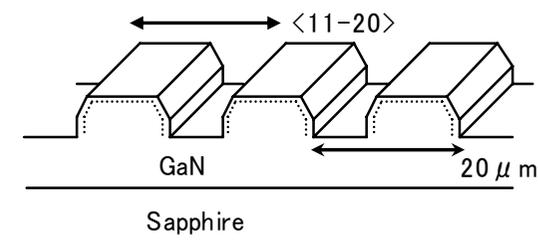


放射光マイクロX線による蛍光体フリー白色LEDの評価

日亜化学工業(株) 榊 篤史

白色LEDは、バックライト用光源、自動車ヘッドライトなど様々な分野で使用されている。とりわけ照明用途は、高発光効率・長寿命・環境安全性などの利点から、従来の白熱電球や蛍光灯に置き換わろうとしている。しかし、現在主流の白色LEDは、青色LEDと黄色蛍光体の組合せで実現され、蛍光体励起時のエネルギー損失や演色性などの発光色調整問題が残されている。そこで、マルチファセットを用いた多波長LEDが提案され、蛍光体フリー白色LEDの実用化が期待されている[1]。この構造では、ファセット内外に生じる発光層膜厚や組成の違いが発光特性を支配しているが、その変化はミクロンレベルであり、発光特性と層構造の関係を明らかにすることは容易で無かった。そこでSPring-8の放射光マイクロビームを用いたX線回折により、ファセット面間/面内における量子井戸構造の位置依存性を評価した。右上図に示す試料構造(点線部がInGaN/GaN量子井戸)についてマイクロビームX線を用い、(0002)反射の ω - 2θ 測定を[11-20]方向に1ミクロンステップで測定した。右下図に強度プロファイルの位置依存性を示す。InGaN/GaN超格子サテライトピークの角度がファセット上の測定点に対応して変化しており、(0001)面内においても、ファセット構造に起因すると思われる超格子の組成および膜厚分布が確認された。[1] M. Funato *et al.*: APEX 1, 011106 (2008)



放射光マイクロX線による 蛍光体フリー白色LEDの評価

～ Structural analysis of phosphor free white LEDs by using
synchrotron radiation microbeam X-ray ～

NICHIAは 世界に貢献できる企業であり続けたいと願っています

Ever Researching For A Brighter World

日亜化学工業株式会社

○ 榊 篤史, 川村 朋晃, 吉田 泰弘, 大野 裕孝, 吉成 篤史, 森本 譲太

~The Earth at Night~

2兆kWh/年消費

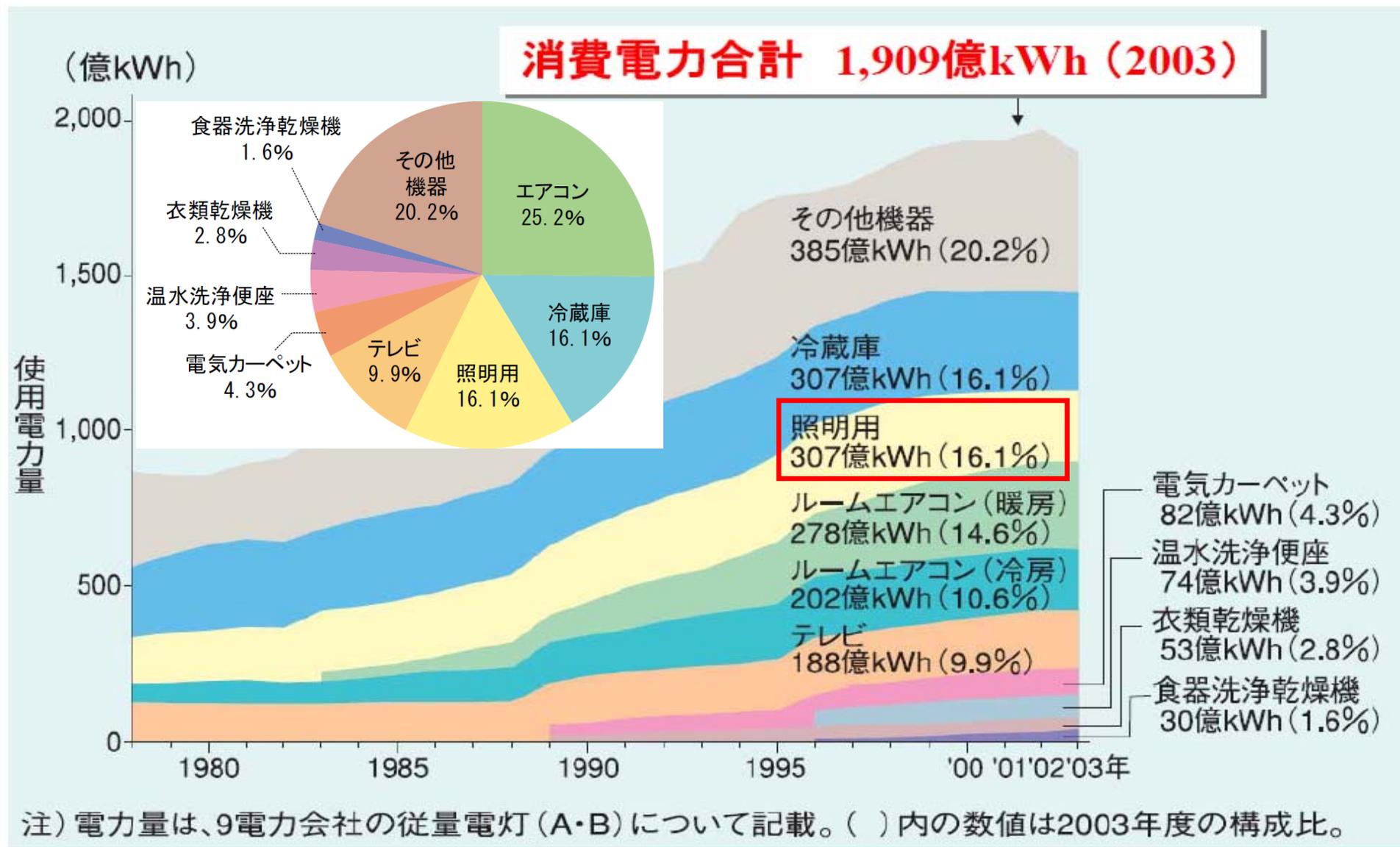
世界総電力消費 15兆kWh × 照明比率 0:15

CO2 9億ton/年排出

排出係数 0.39(kgCO₂/kWh)

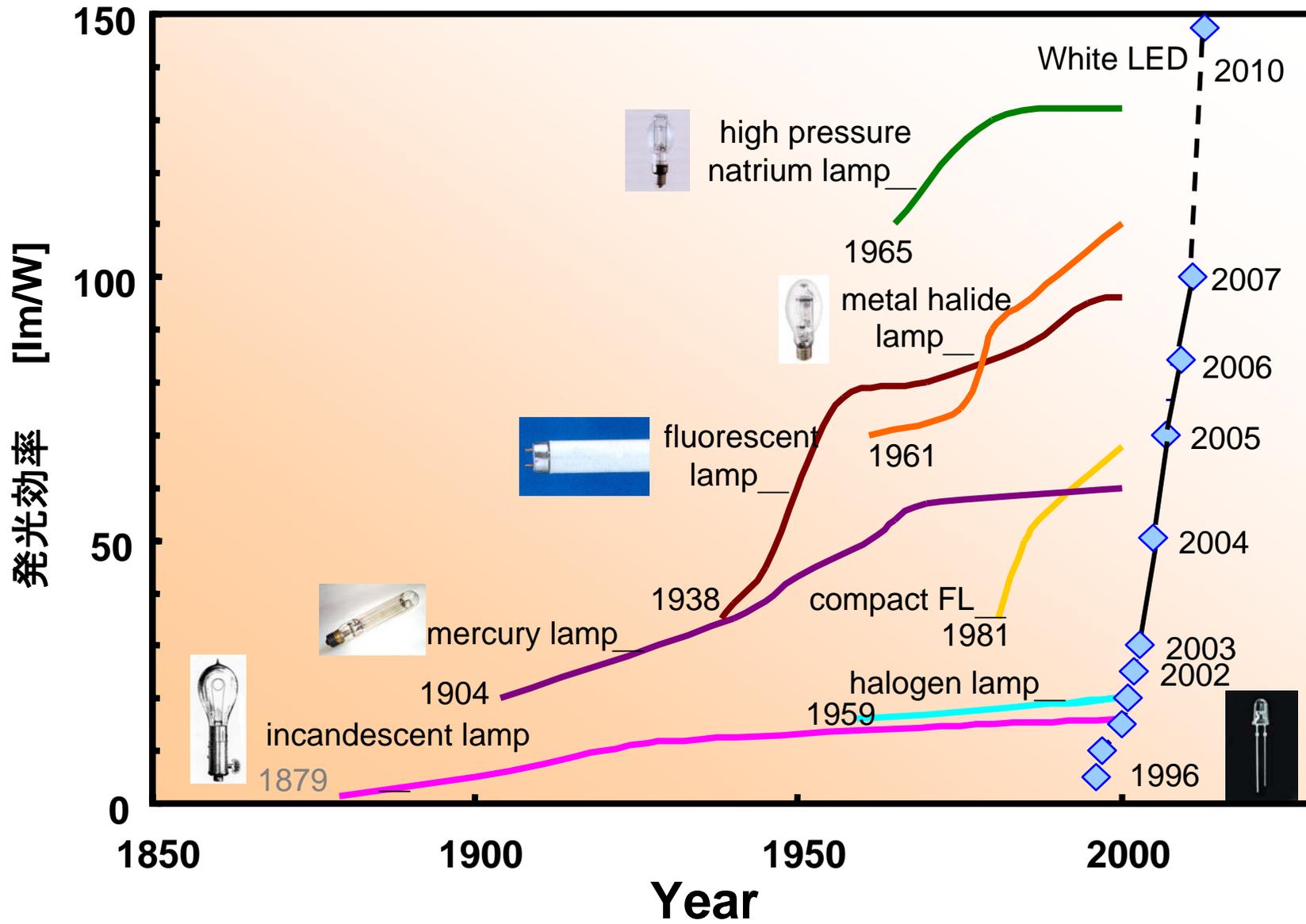
電球のLED化で 40% 削減

Credit: C. Mayhew & R. Simmon (NASA/GSFC), NOAA/ NGDC, DMSP
http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?vev1id=582

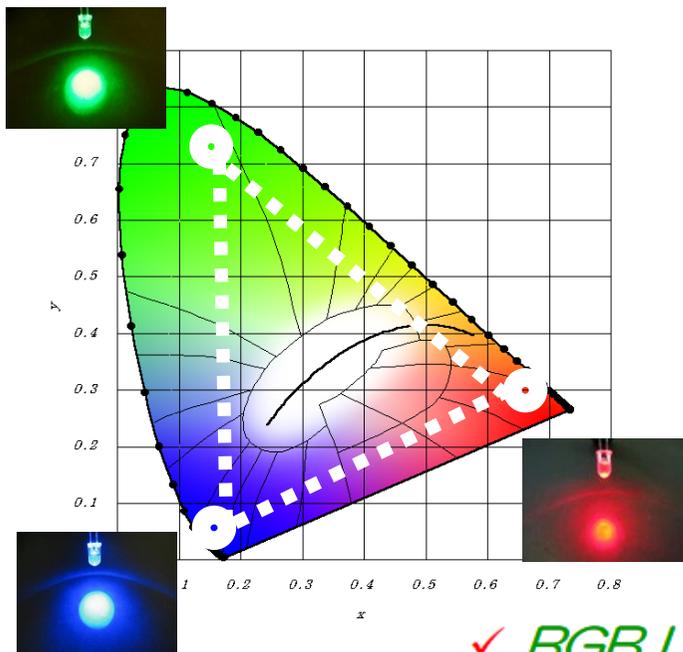


資源エネルギー庁「電力需給の概要」(2006)より

～白色LEDの発光効率～



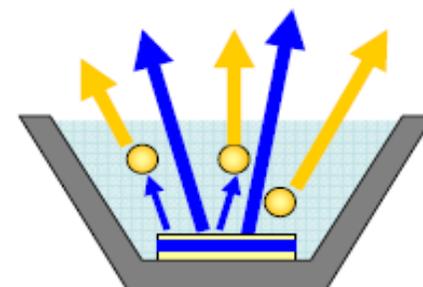
～白色LEDの実現方法～



✓ blue LED + 蛍光体

- ☺ 白色LEDとして大成功。固体照明の本命
- ☹ 青色⇒黄色への変換の際のストークスエネルギー損失
- ☹ 材料選択に制限 ⇒ スペクトル合成に制限

(UV-LED+RGB蛍光体)



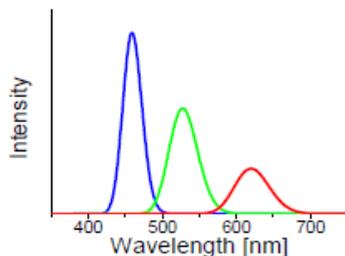
LED + phosphor

✓ RGB LED の組み合わせ

- ☺ 高い発光色制御性
- ☹ 駆動回路が3系統必要
- ☹ サイズが大きくなる

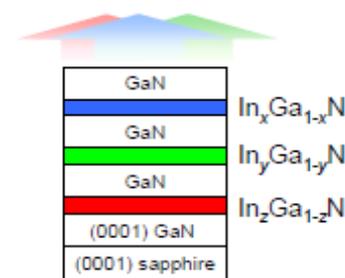


Individual LEDs



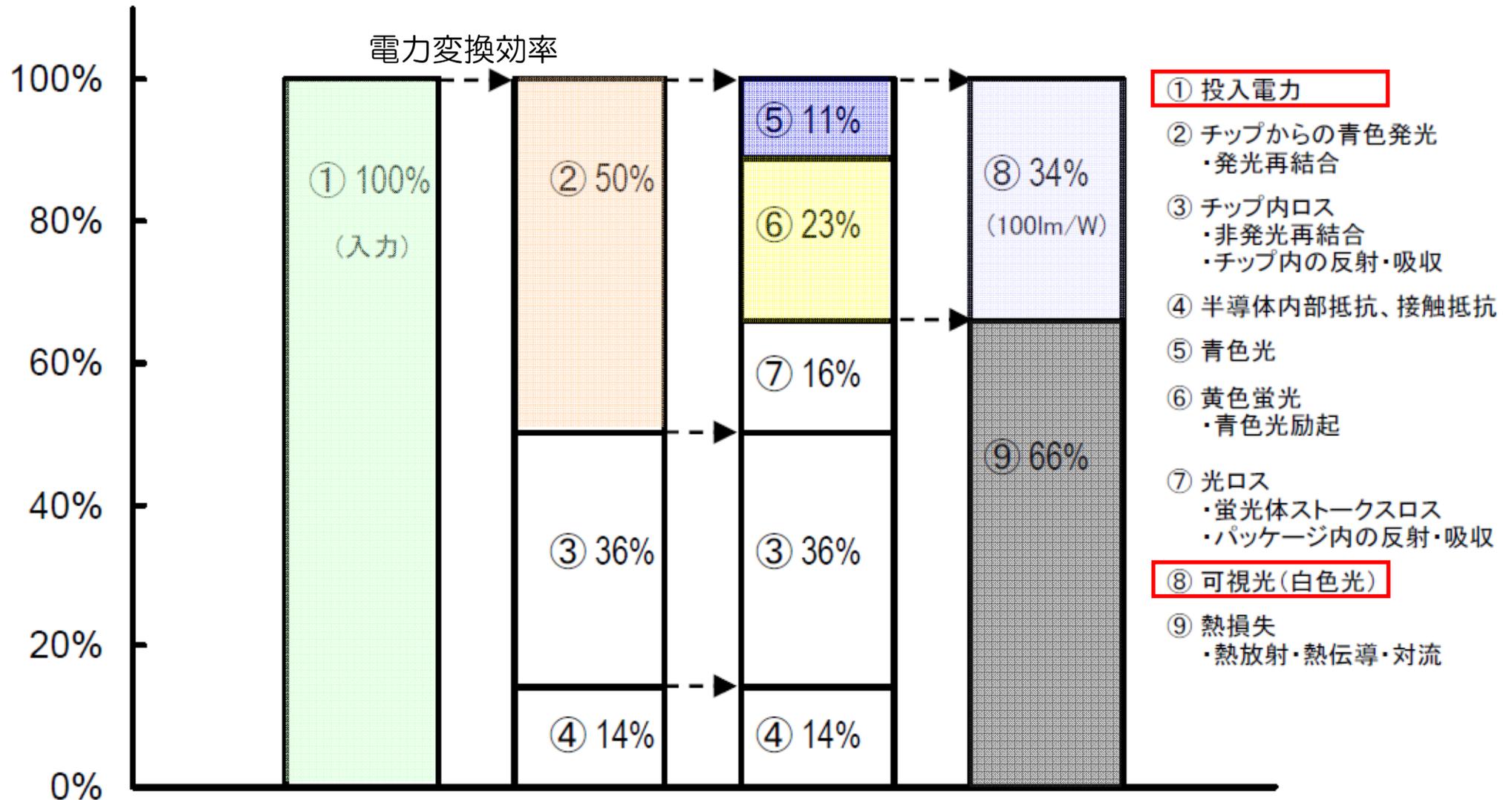
✓ 積層型LED

- ☺ 素子サイズ小さい
- ☹ 各発光層のからの発光強度比を制御できない ⇒ 発光色制御性悪い



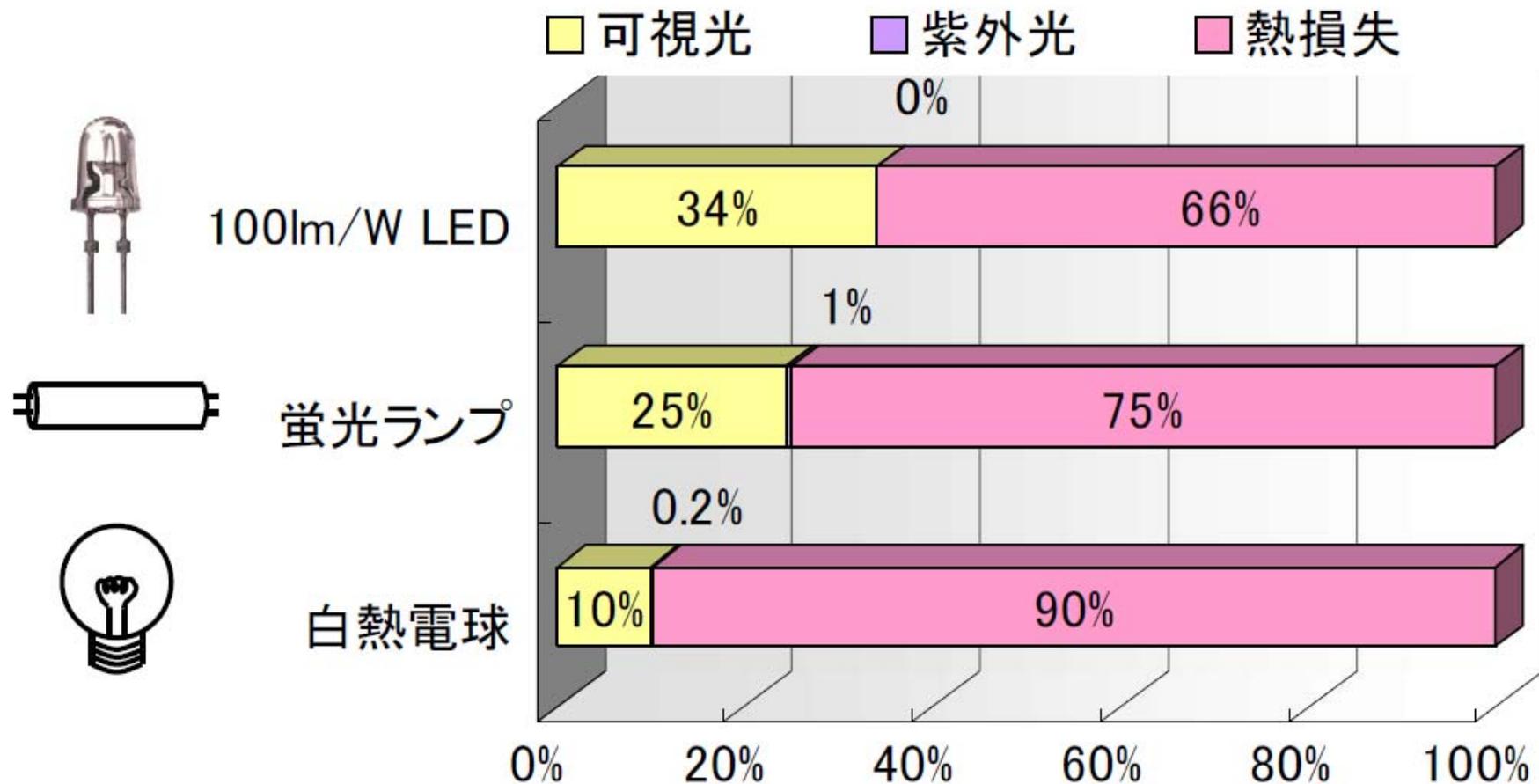
Stacked QWs

～白色LEDの課題 1 エネルギー変換～



※ InGaN/YAG砲弾型ランプ(20mA駆動、順電圧3.1V、100lm/W、6500K)についてのシミュレーション

～白色LEDの課題1 エネルギー変換～



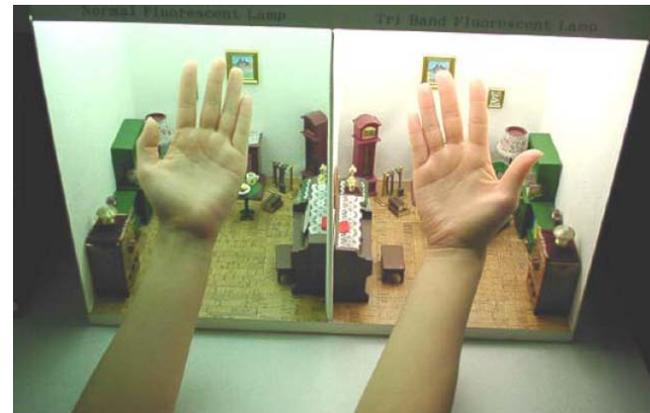
100lm/W白色LED(6500K)、蛍光ランプ、白熱電球のエネルギー変換率の比較

白熱電球の3倍以上，蛍光ランプの約1.3倍，ではあるけども...

(同じ明るさで照らすなら，LEDが最も消費電力が小，発熱も小，効率的)

～白色LEDの課題2 演色性～

◆演色性・・・基準光（黒体放射）を100として物体の色の違いを比較する指標



『物体の色』は『光源の色』に強く依存
光源のスペクトルを目的に応じて自在に制御
→ 所望の物体色が得られる

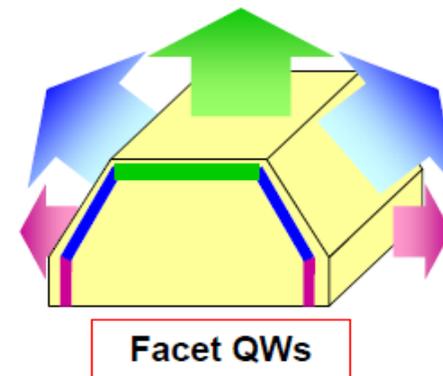
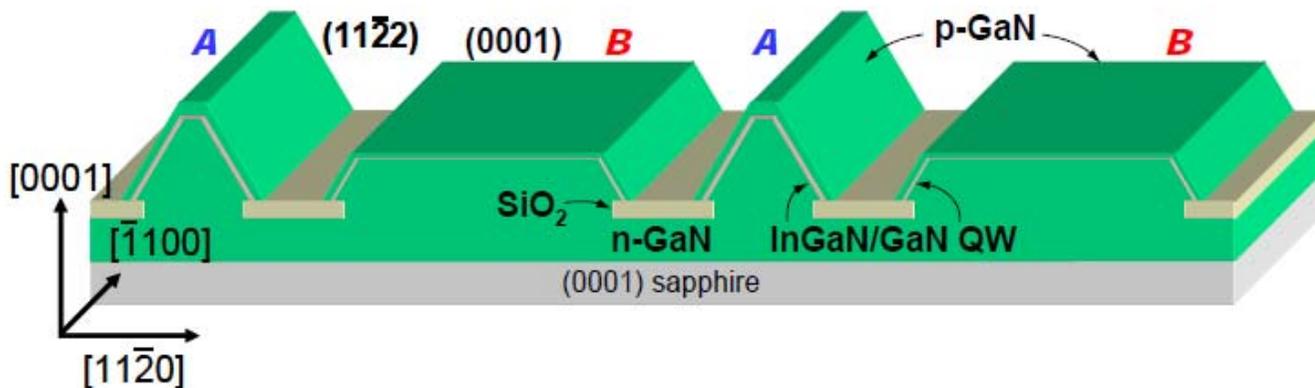
今後の固体照明の基盤技術
一般照明，展示照明，医療分野等に応用期待

～照明光源としての白色LED マルチファセットの提案～

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ を発光層・・・In組成を振る事でバンドギャップを制御

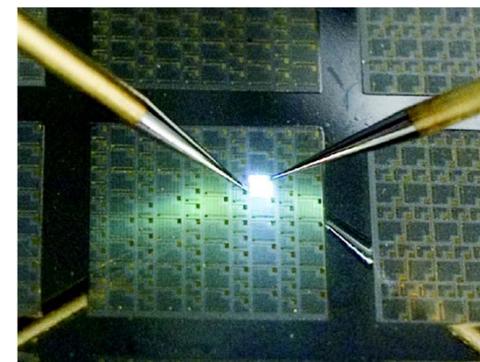
近紫外 (GaN : 3.4eV) ～赤外 (InN : 0.7eV) = 可視光領域をカバー

- ・再成長によるファセット形成
- ・ファセット面間による多波長発光

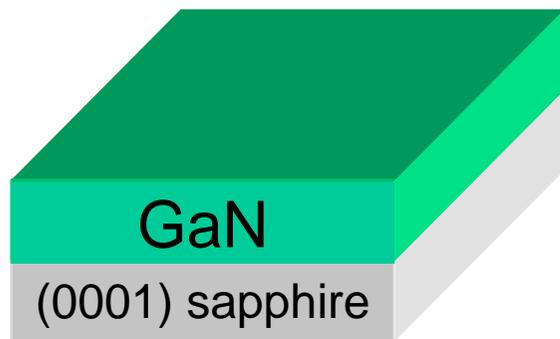
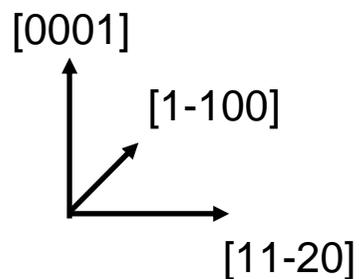


APEX 1, 011106 (2008)
APL 93, 021126 (2008)ほか

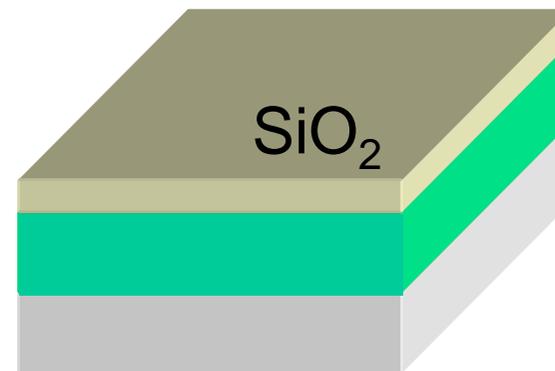
蛍光体フリーのため、色変換によるエネルギーの損失無し
白色の他、パステルカラー、高い演色性制御
半極性面からの高い内部量子効率
三次元構造による光取り出し効率向上



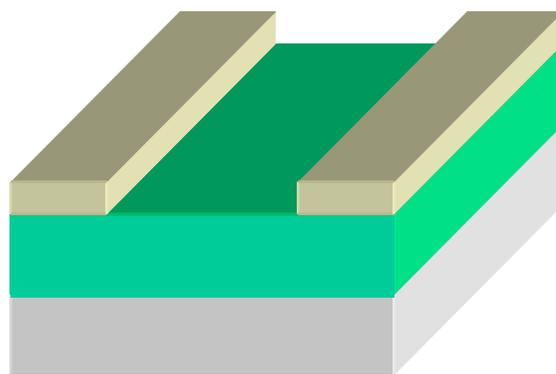
～試料作製方法～



1. conventional MOVPE

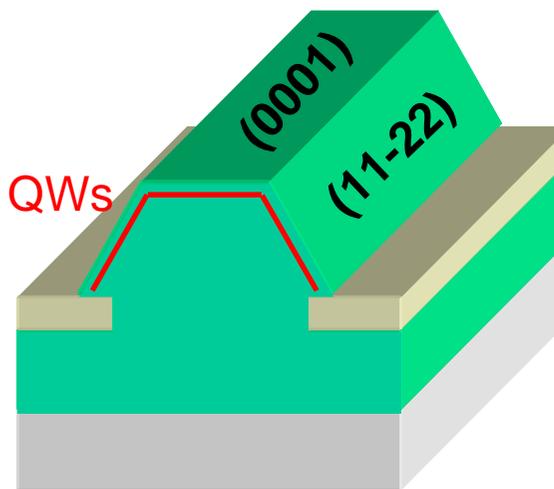


2. 100-nm-thick SiO₂ by PECVD



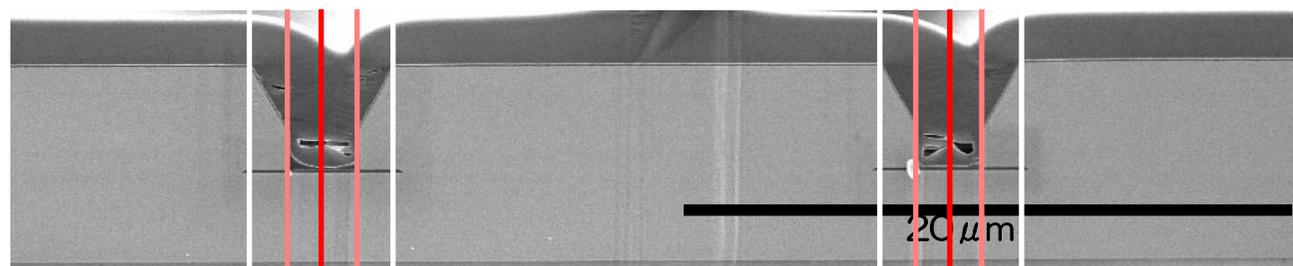
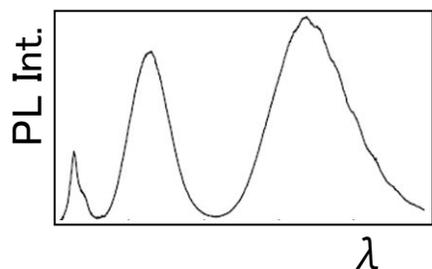
3. Photolithography and wet etching to create stripe mask

InGaN/GaN QWs

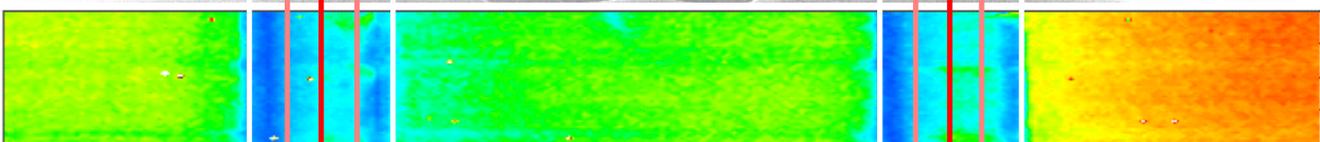


4. Regrowth of GaN and InGaN QWs

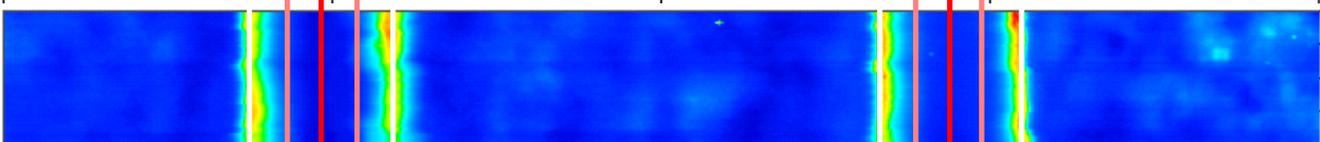
～試料概要～



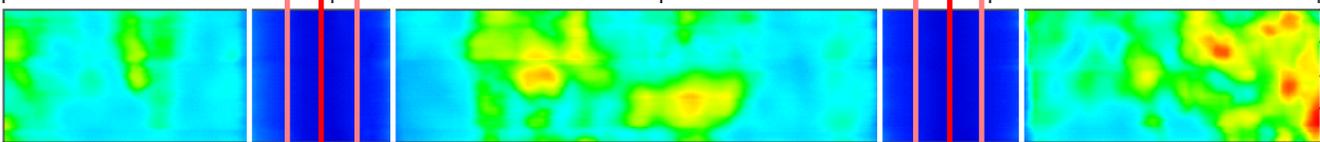
380~440nm



440~470nm



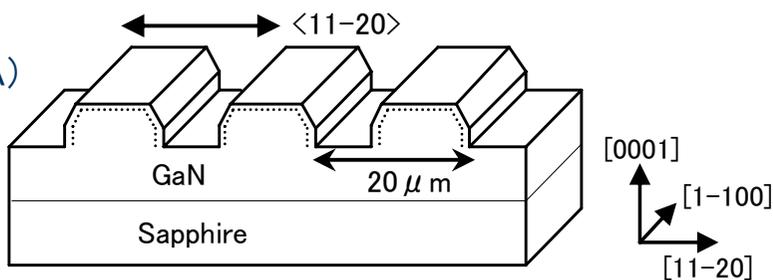
470~620nm



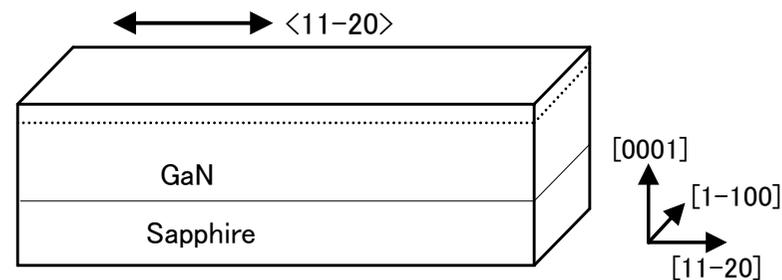
PL Intensity [a. u.]

InGaN(3nm)/GaN(10nm) *5periods

(サンプルA)

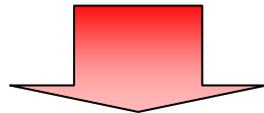


(サンプルB)



～モチベーション～

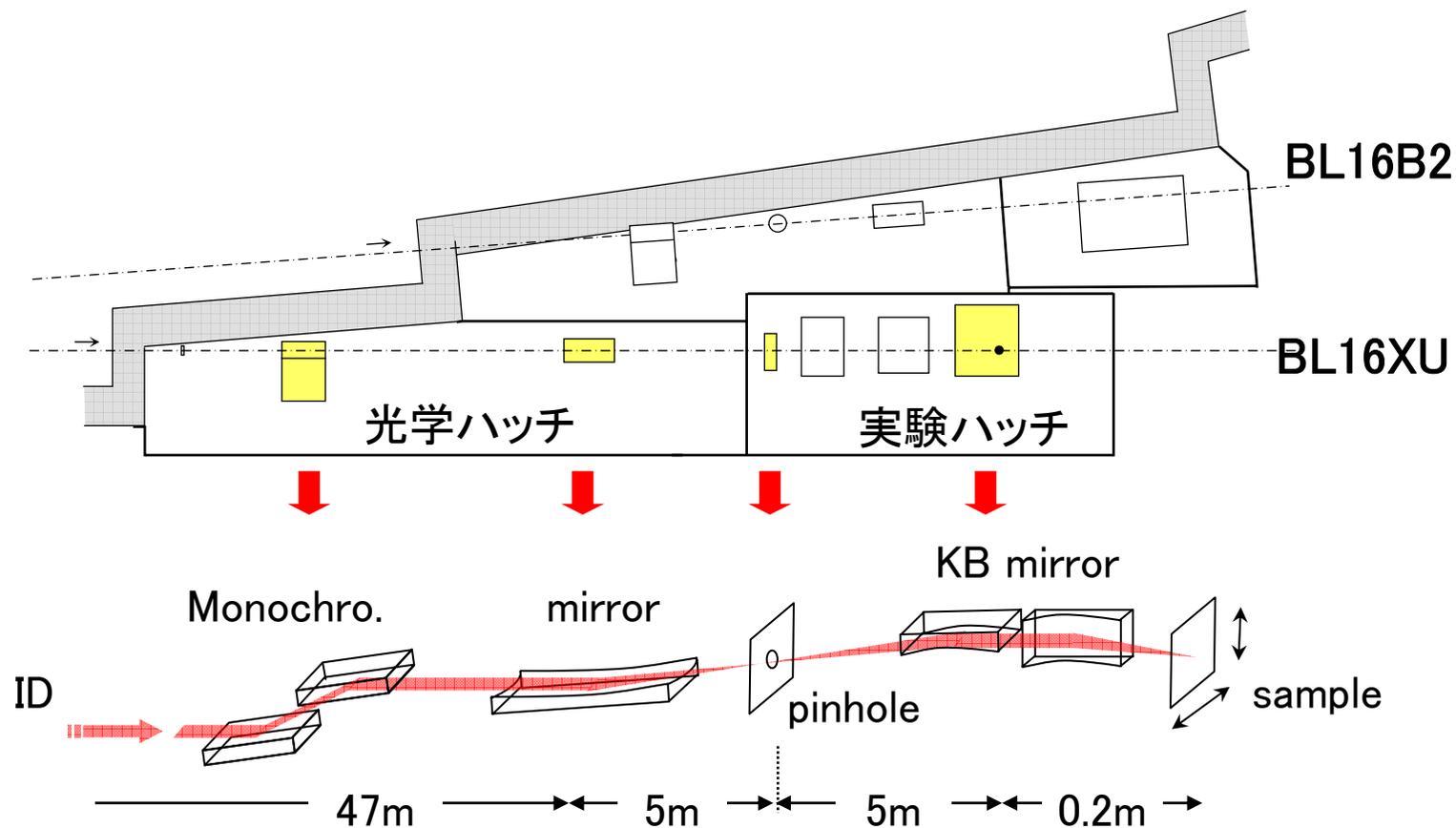
- このようなファセット構造に対し、
光学特性と構造解析の関係を明確化したい
 - (S)TEM分析（破壊測定）
 - 膜厚・・・Å単位での測長（煩雑）
 - 組成・・・電子線拡がりの影響で低めに算出（EDX）
 - X線回折
 - 対象領域が微小である為、ラボ装置では不可能



- 本研究では
SPring-8の放射光マイクロX線を用いた回折測定により
マイクロファセット内のナノ構造精密評価を試みた

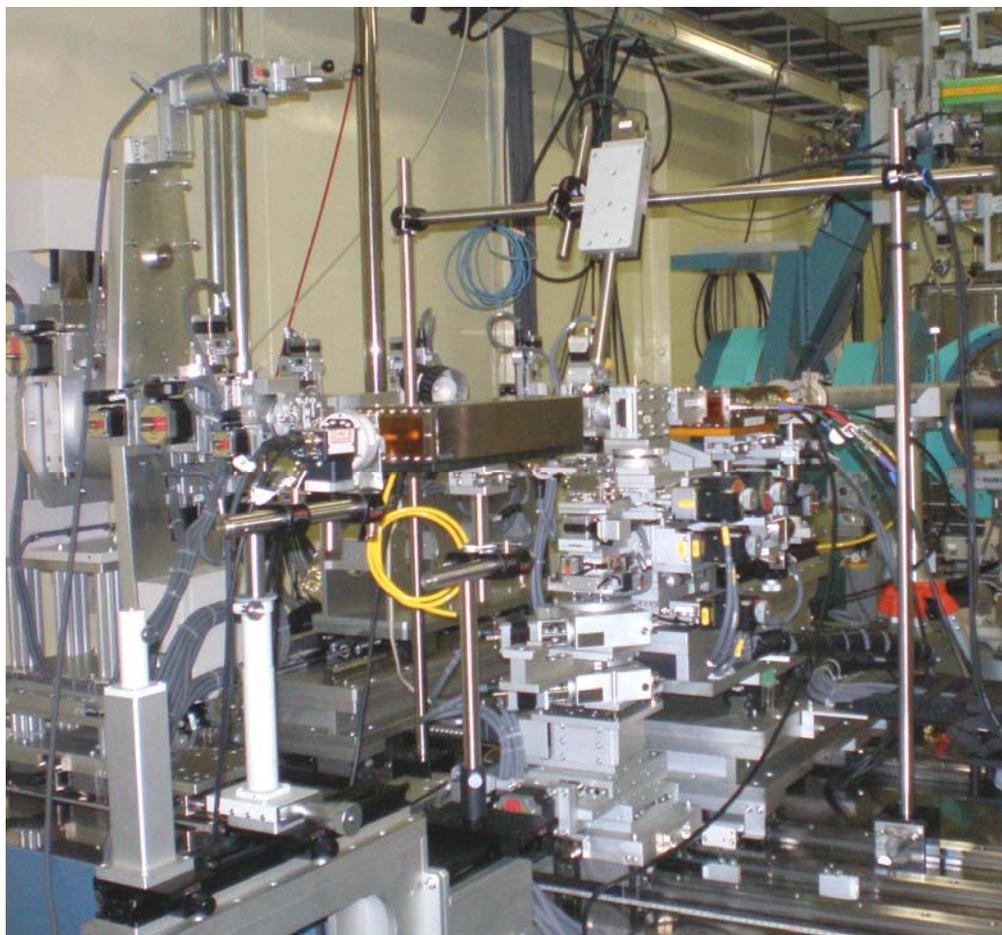
~BL16XU マイクロ装置~

KBミラーを用いたマイクロビームX線の形成



~BL16XU マイクロ装置~

ピンホールを仮想光源, ①KBミラー / ②FZP 両者選択可能



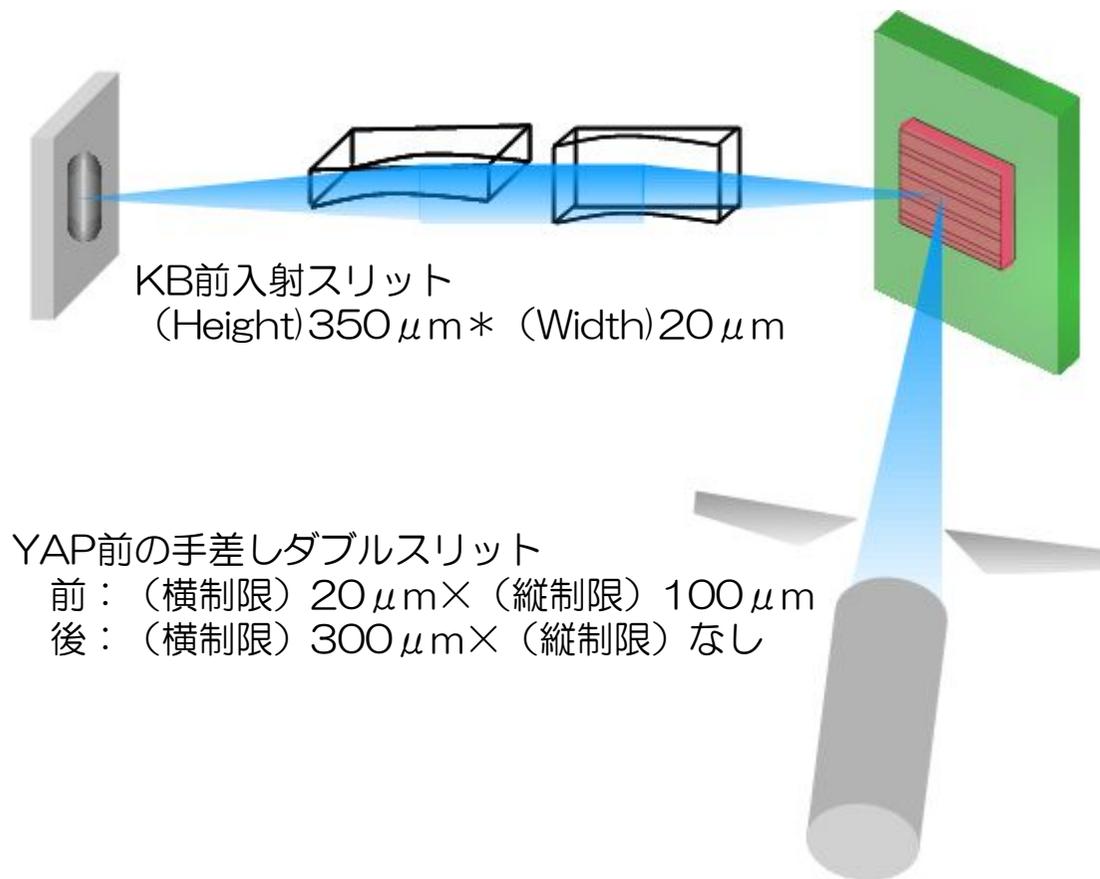
①KBミラー



②FZP

 マイクロSGポスターより抜粋

～実験手順～



KB前入射スリット
(Height) 350 μm * (Width) 20 μm

YAP前の手差しダブルスリット

前：(横制限) 20 μm * (縦制限) 100 μm

後：(横制限) 300 μm * (縦制限) なし

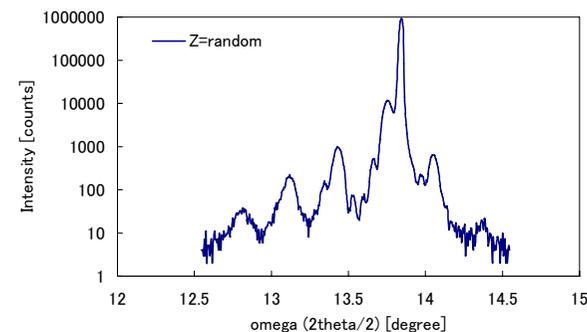
ω -2 θ 測定

サンプル 1 μm 下へ移動

ω -2 θ 測定

サンプル 1 μm 下へ移動

くりかえし測定



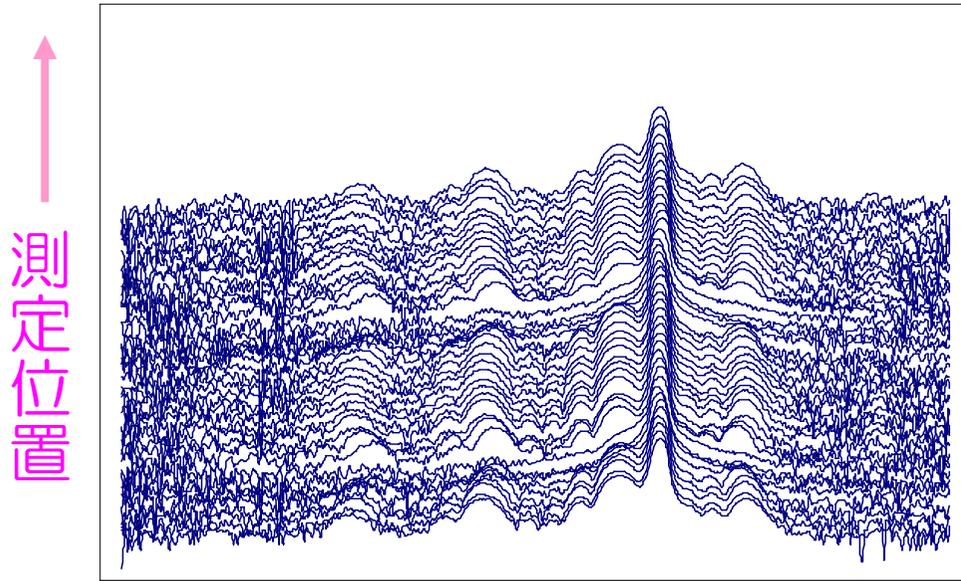
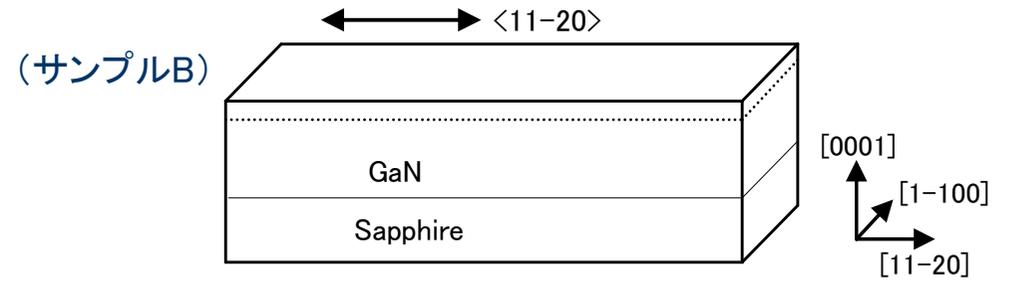
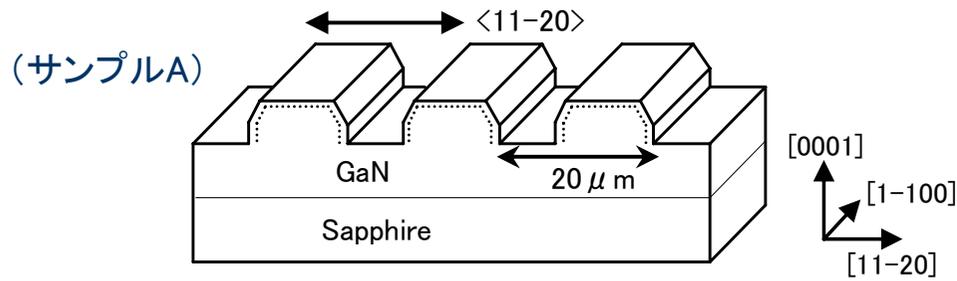
◆測定条件

10keV / YAP使用 (高圧-1.05V)

ビームサイズ：縦 0.40 μm / 横：0.28 μm (BL16XU)

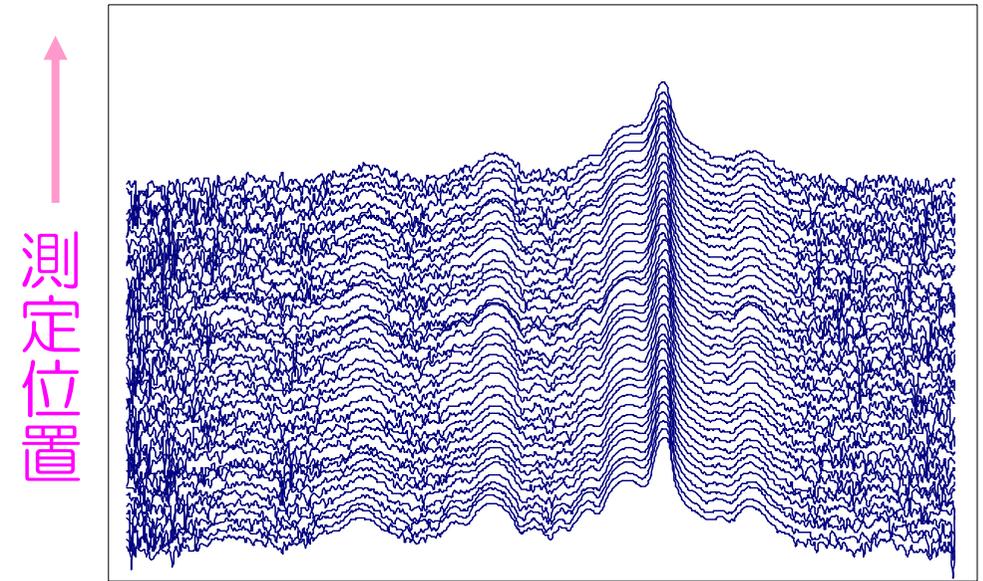
I_0 : 0.48 μA @XRF

～実験結果 ω - 2θ プロファイル多点測定～



→ 回折角 ω

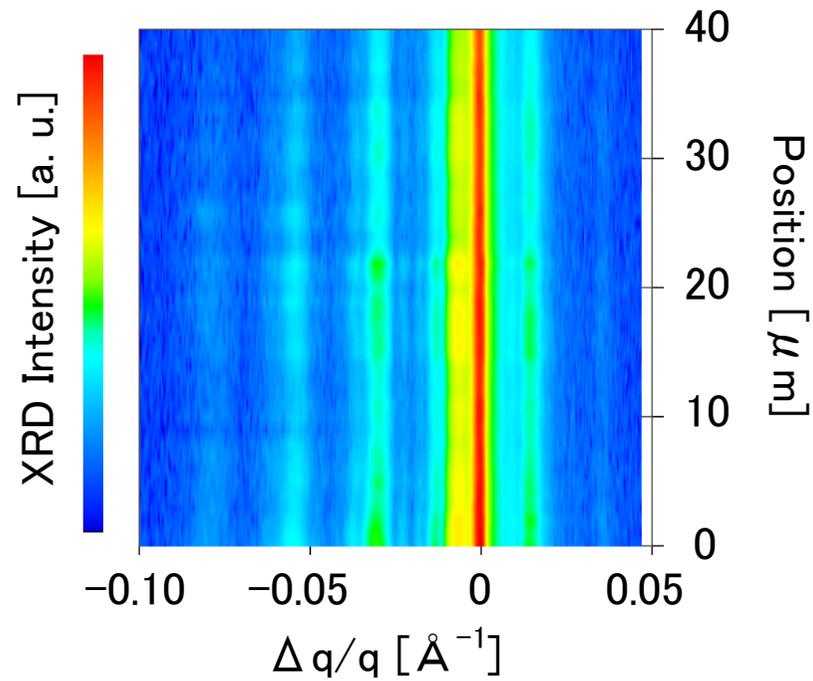
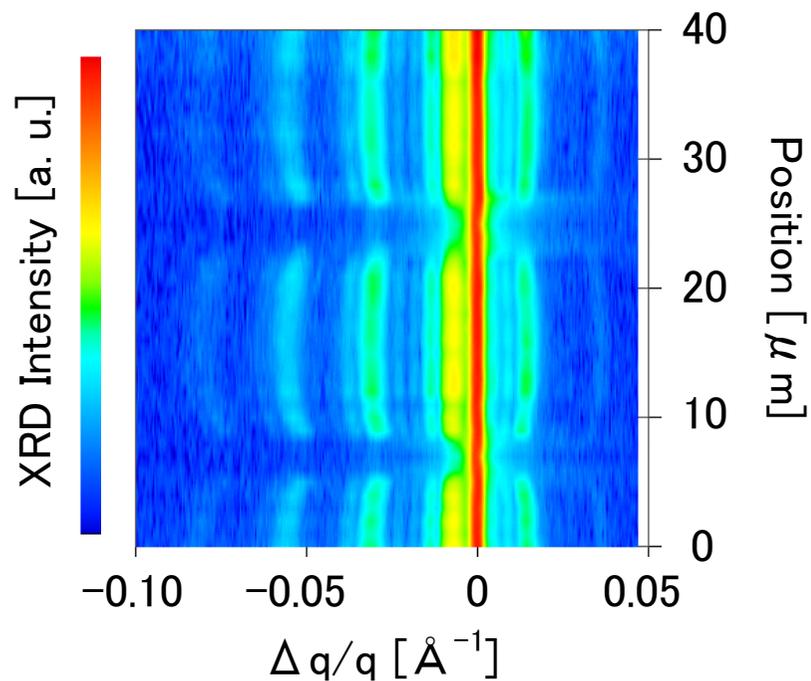
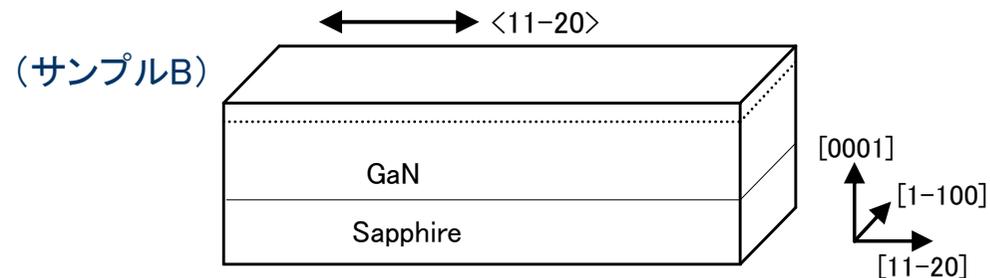
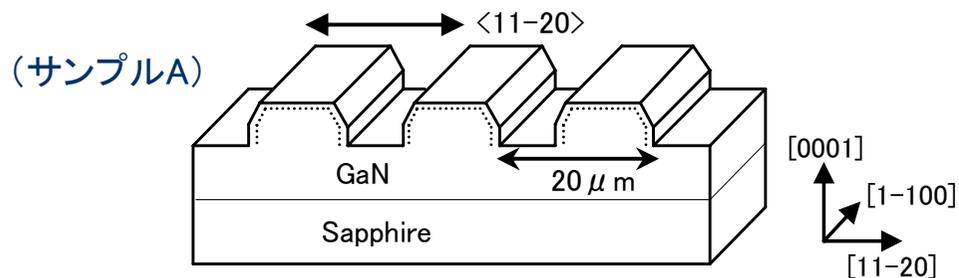
(ビームサイズ: $V=0.61 \mu\text{m}$, $H=1.89 \mu\text{m}$)



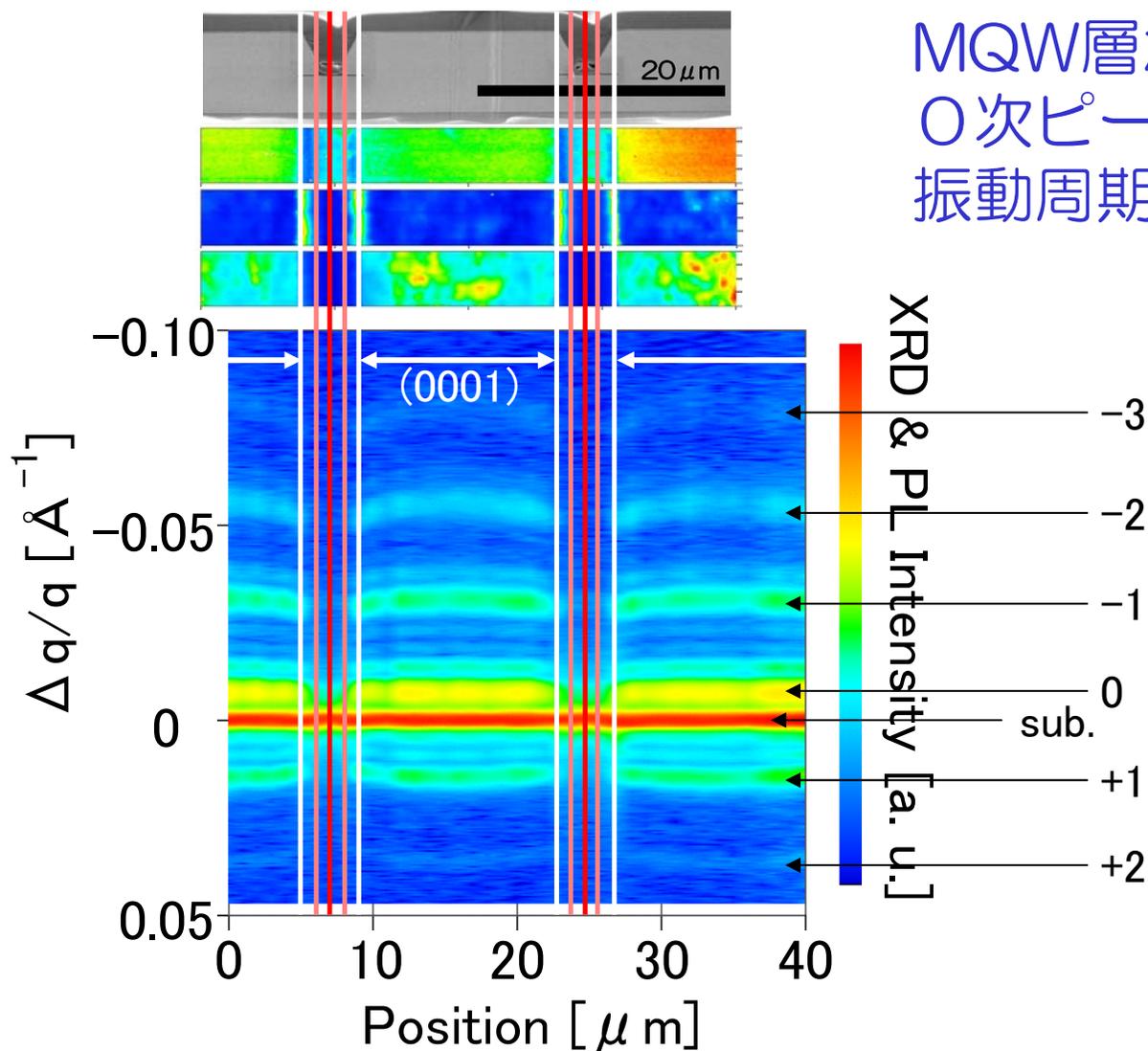
→ 回折角 ω

(ビームサイズ: $V=0.84 \mu\text{m}$, $H=1.81 \mu\text{m}$)

～実験結果 ω - 2θ プロファイル強度マップ～



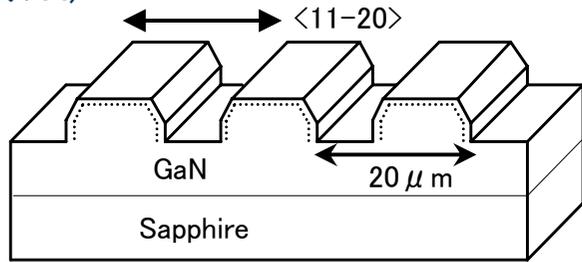
～実験結果 SEM+PL+XRD相関～



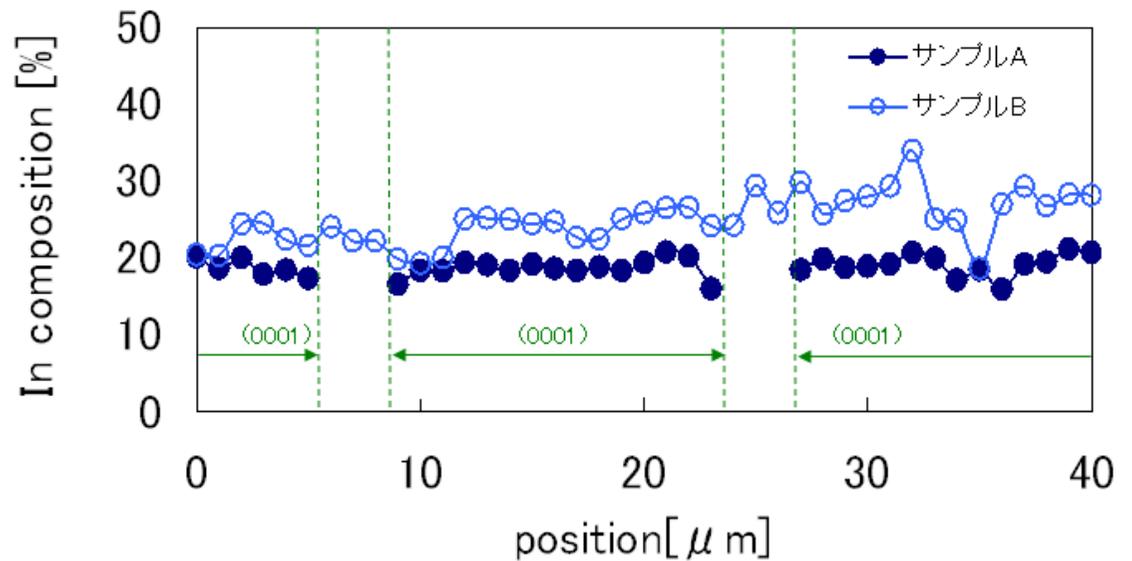
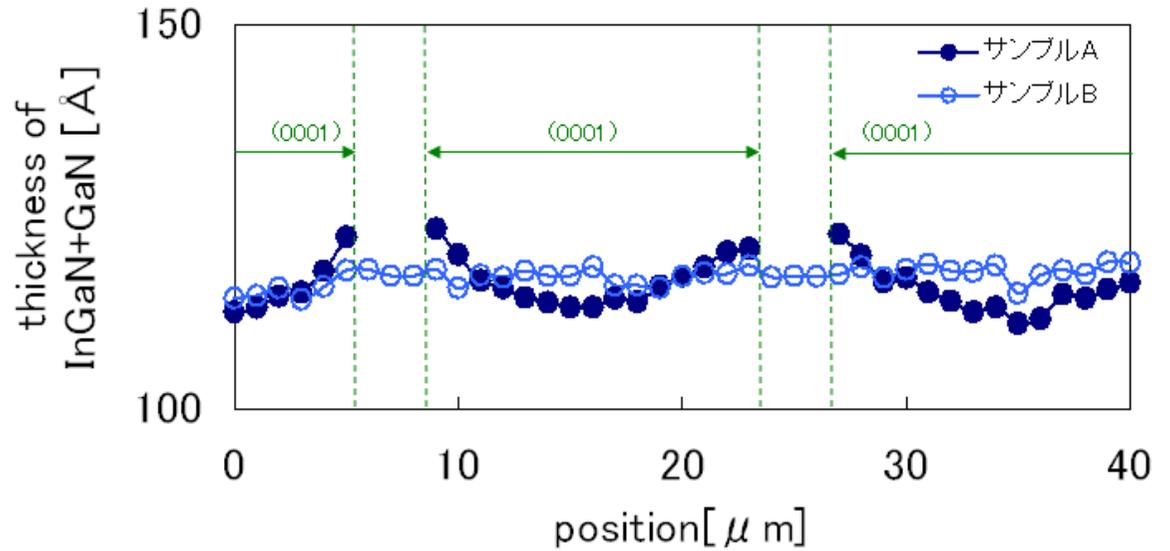
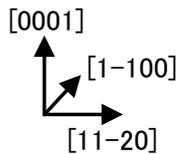
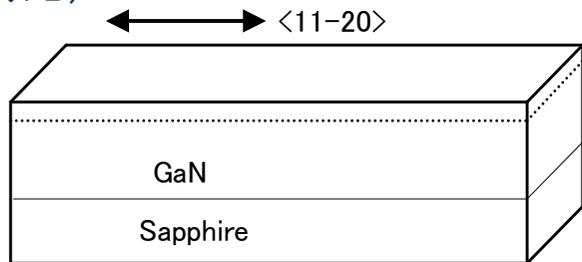
MQW層からの
0次ピーク位置変化＝組成に対応
振動周期＝膜厚に対応

～実験結果 ω - 2θ プロファイル fitting 解析～

(サンプルA)



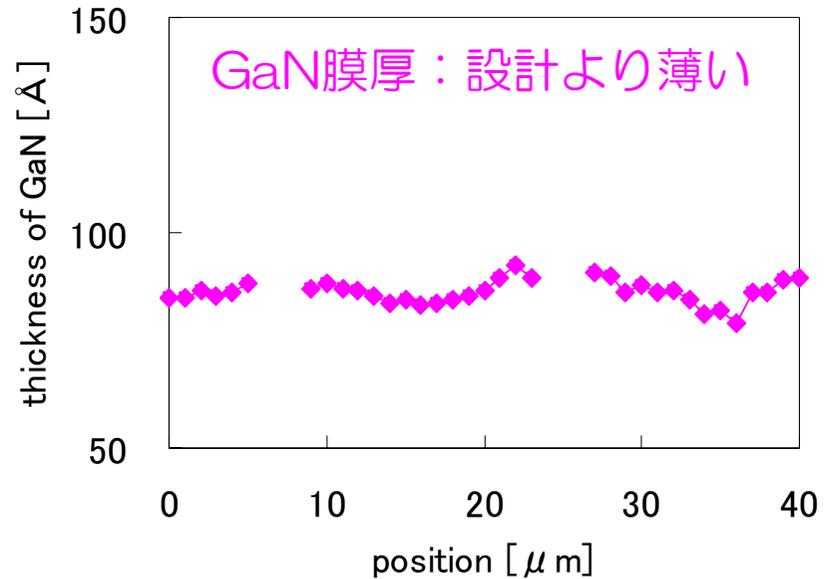
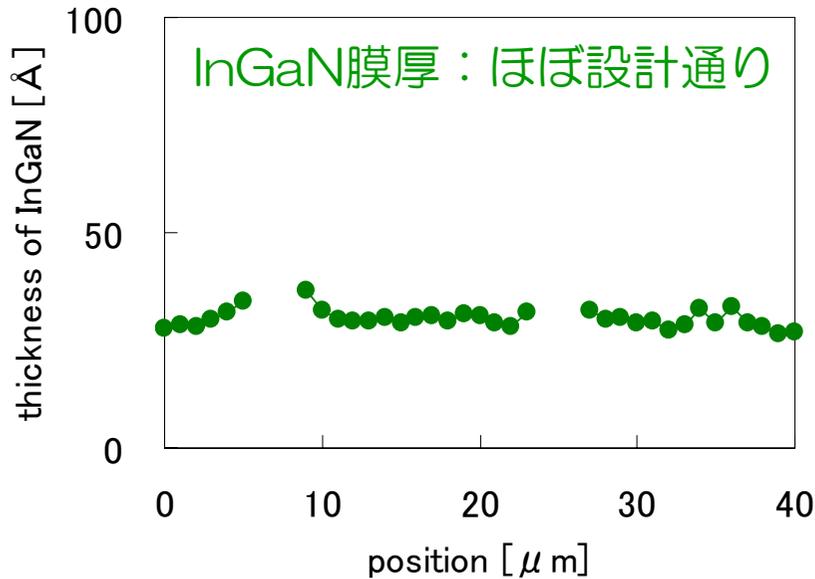
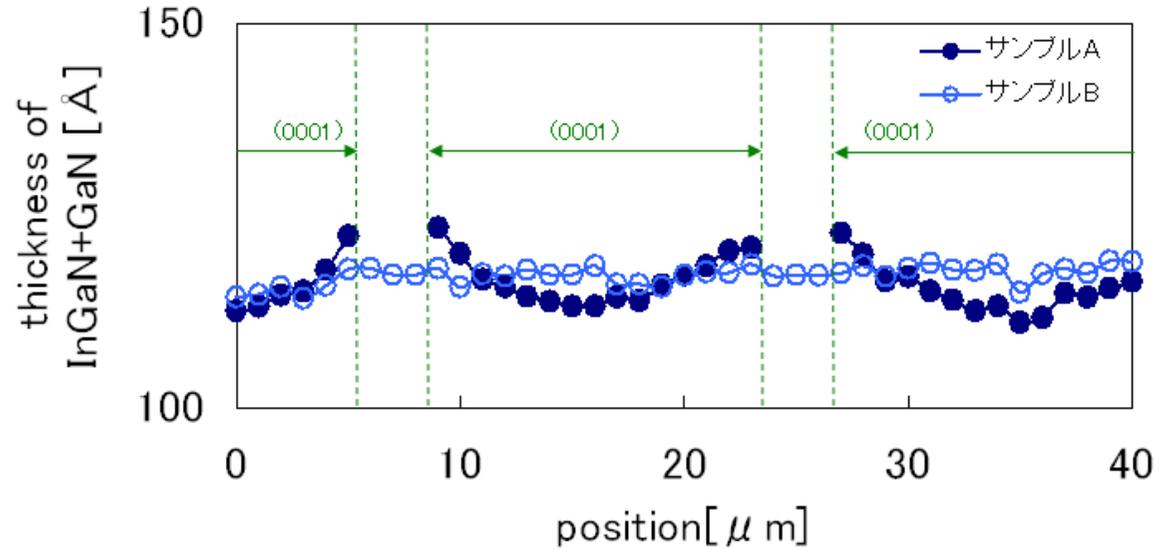
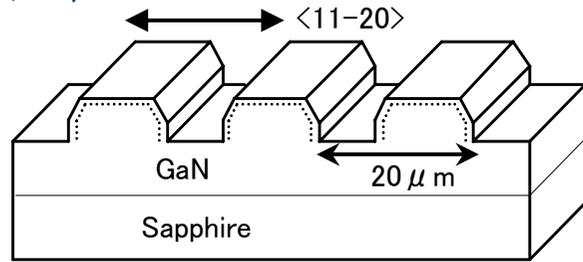
(サンプルB)



膜厚の位置依存性に比べて，組成の位置依存性は小さい

～実験結果 ω - 2θ プロファイルfitting解析～

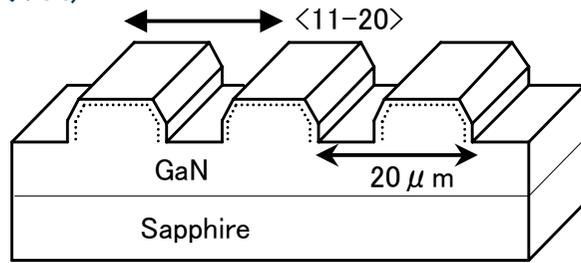
(サンプルA)



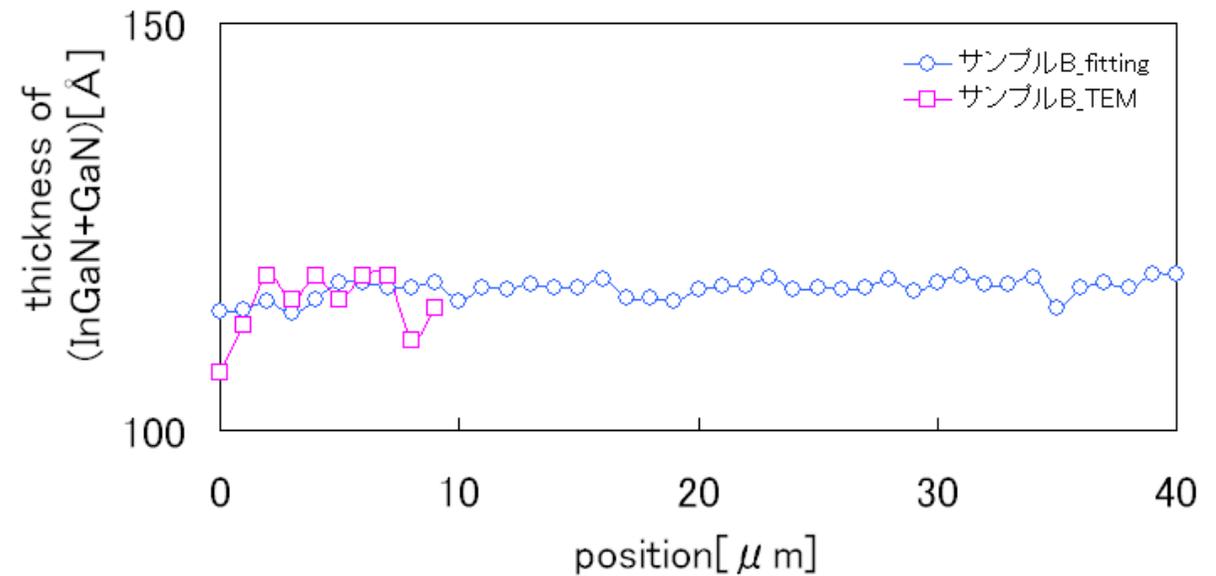
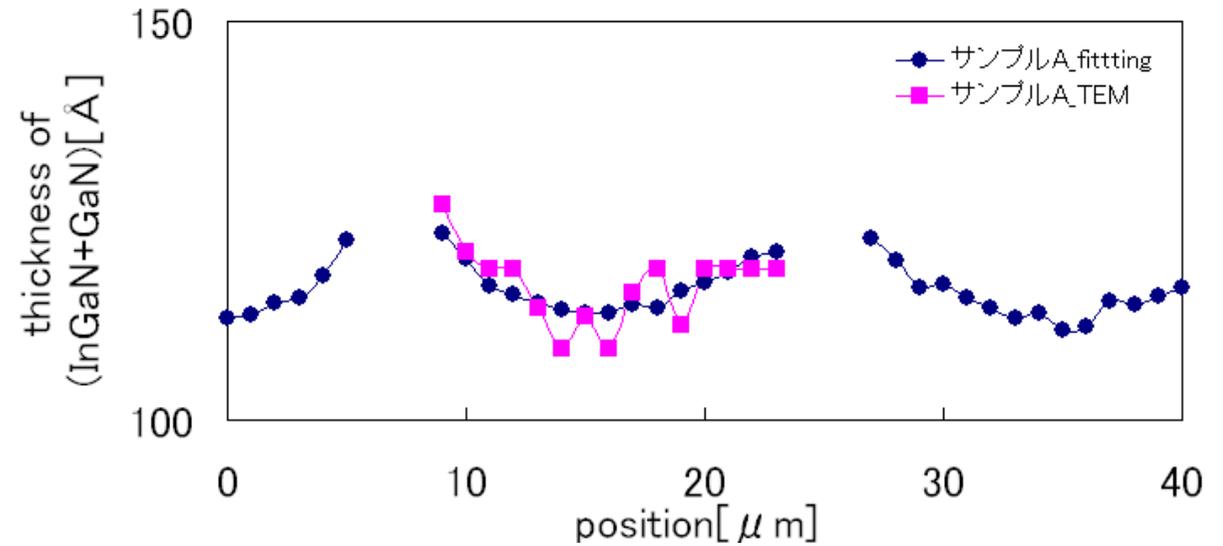
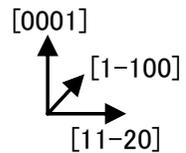
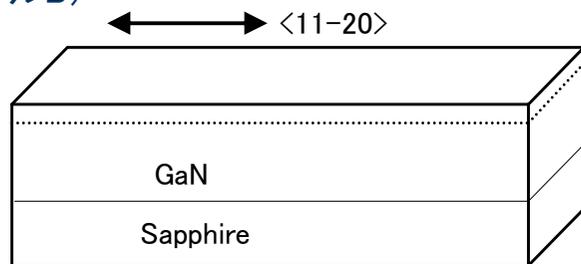
膜厚の位置依存性は、InGaNとGaNの両方

～実験結果 ω - 2θ プロファイル fitting 解析～

(サンプルA)



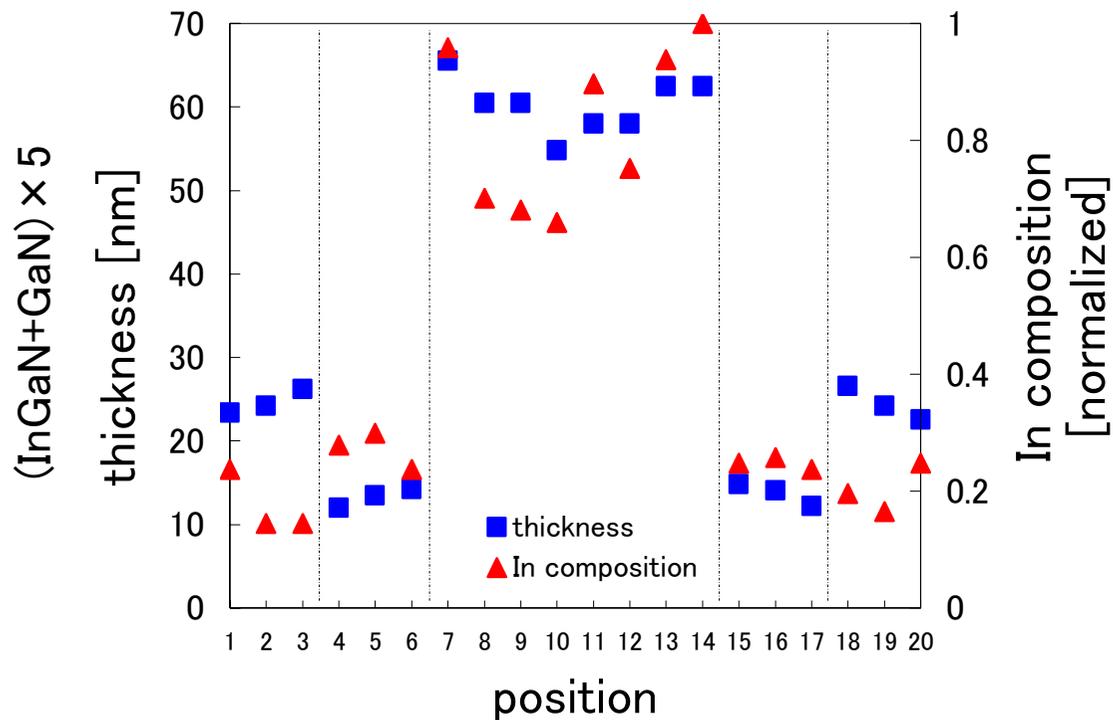
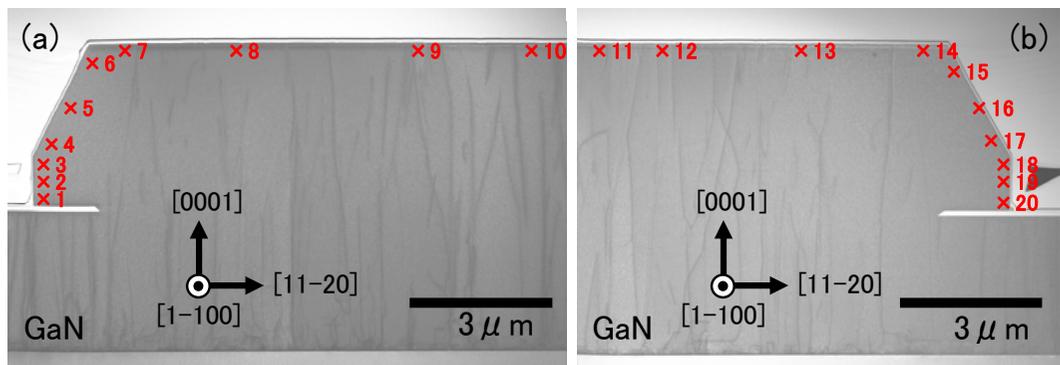
(サンプルB)



fitting膜厚はTEM測長結果とほぼ一致

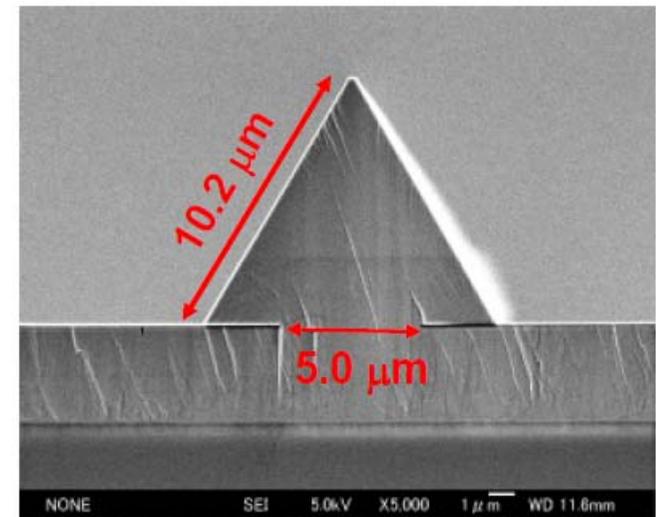
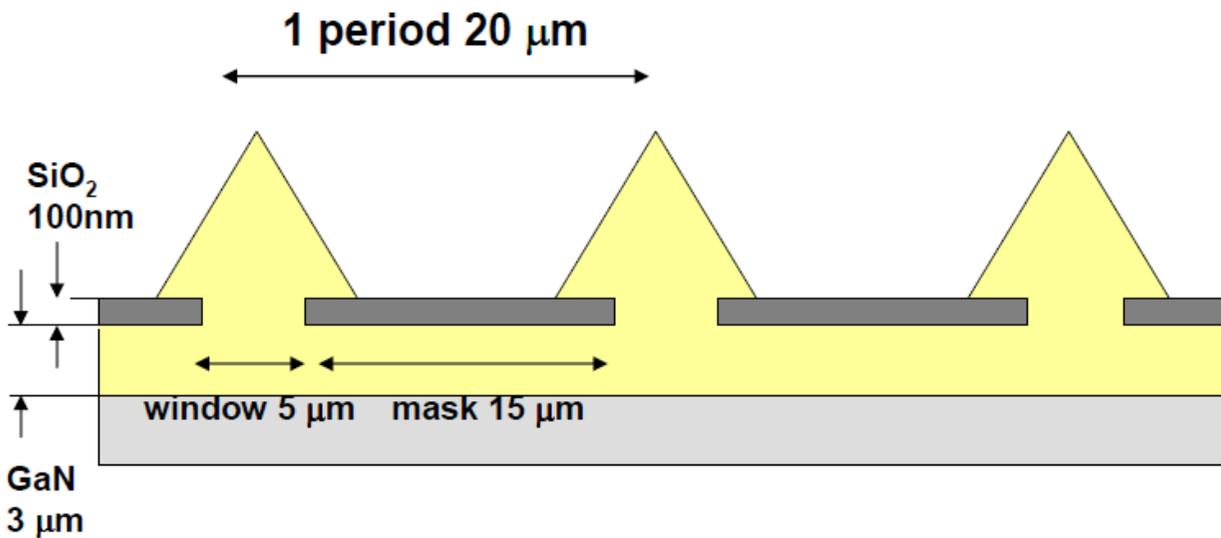
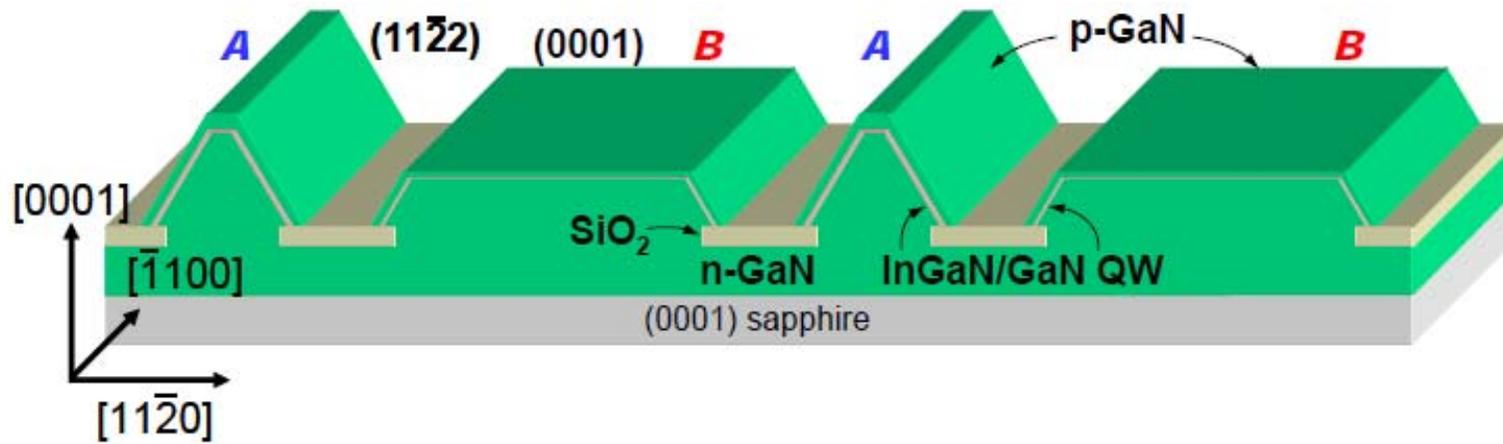
～参考 TEM(-EDX)による膜厚と組成評価～

(サンプルA)

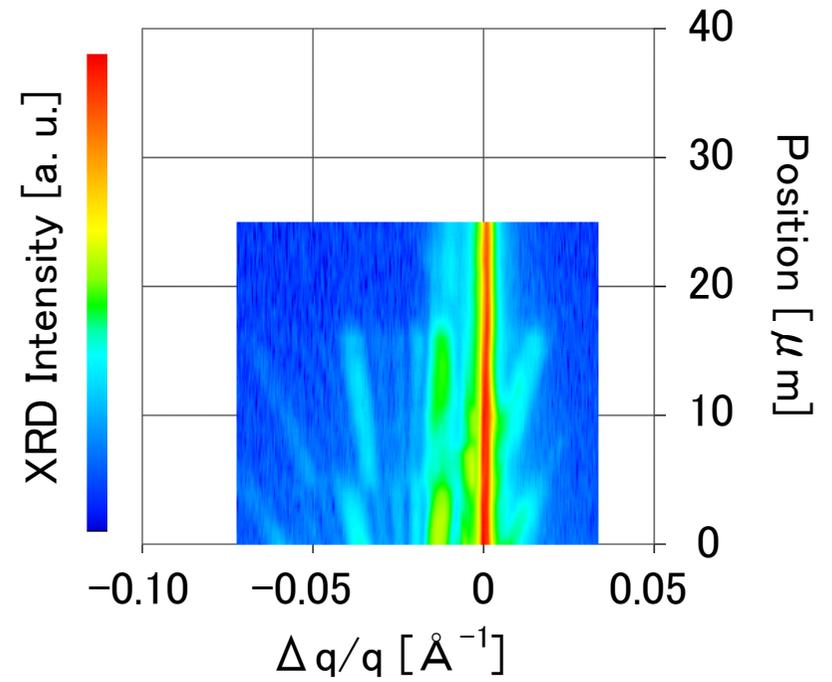
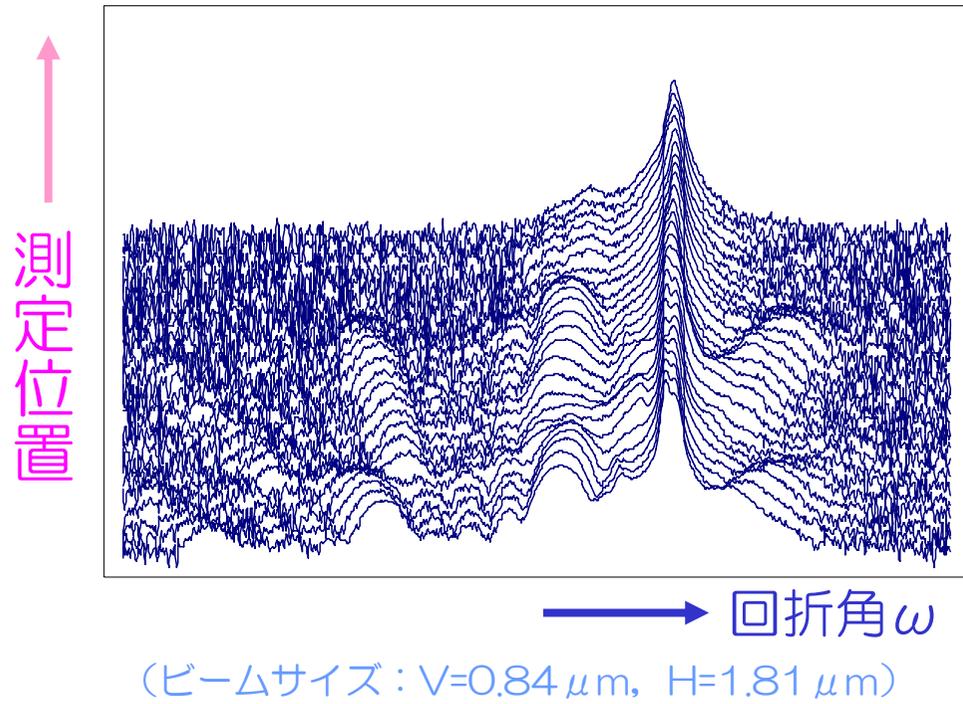


TEM-EDX組成は低めに算出

～実験結果 11-22反射～



～実験結果 11-22反射～



～まとめ～

- ・サブ μm サイズに集光したX線ビームを用い、マルチファセット構造上に形成したInGaN/GaN_QWsの微小領域X線回折構造評価を行った。
- ・X線照射位置を1 μm ステップで変化させながら、InGaN/GaN超格子の ω - 2θ 位置依存性を測定したところ、ファセット形状に起因した、InGaN/GaN超格子の0次およびサテライトピーク角度、フリンジ角度の変化が確認された。
- ・(11-22)ファセットを有する事による(0001)ファセット内(センター/エッジ間)の構造分布が確認され、これは同領域で発光波長分布が存在するという光学特性の結果と合致する。従来明確ではなかった光学特性と量子井戸構造の関係について、 μm レベルでの議論が可能になった。
- ・マイクロXRRの実験を検討。