

# ワイドギャップ半導体 エレクトロニクス

京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻  
半導体物性工学分野

須田 淳 · 木本 恒暢

## Contents

- 予備知識  
半導体・ワイドギャップ半導体・キーデバイス
- ワイドギャップ半導体への期待  
社会の要請、理論的に期待される性能
- 研究の現状  
これまでの研究、技術的課題、これからの研究
- 最新研究紹介  
ワイドギャップ半導体の機能的融合
- まとめ

## semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

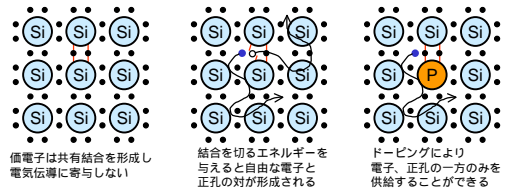


## 半導体とは？

金属 — 半導体 — 絶縁体      半導体は絶縁体の一種

### 絶縁体と半導体の違い

エネルギーバンドギャップがほどほどの値  
ドーピングにより n 型、p 型を作製可能



## ワイドギャップ半導体とは？

バンドギャップの大きな半導体 ... 結合の強い半導体

材料	バンドギャップ
C	5.47 eV
Si	1.12 eV
Ge	0.66 eV
Sn	0.08 eV

代表的なワイドギャップ半導体

SiC	3.20 eV
GaN	3.42 eV
ZnO	

バンドギャップが大きいと何が嬉しいか？ それは後で説明します。

## キーデバイスとは？

製品・システムの性能を左右する「最先端デバイス」のこと

DVDレコーダー ... システムLSI, 半導体レーザー

抵抗器 ... キーデバイスではない  
同等の性能の部品を作る会社が多数ある

キーデバイス

最先端技術が投入されており誰でも作れるデバイスではない  
外注ではなく社内で独自開発

キーデバイスを外部に頼ると  
独自性発揮できない · 供給元に支配されてしまう

研究背景

**エネルギー 環境問題 (Power Technology)**  
 CO<sub>2</sub>排出量削減 (機器の高効率化)  
 超低損失スイッチングトランジスタ  
 耐圧と損失のトレードオフ

**ユビキタスネットワーク (Information Technology)**  
 次世代移動体通信 (小型化・高周波化)  
 高出力高周波トランジスタ  
 高周波化とパワーのトレードオフ

いずれも日本の産業の中核分野におけるキーデバイス

高まる高性能化の要求 ... 既存材料(Si,GaAs)の理論限界

ワイドギャップ半導体の諸物性

	Si	GaAs	SiC(4H)	GaN
Bandgap (eV)	1.12	1.43	3.26	3.39
Electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	1350	8000	1000	1000
Breakdown field (MV/cm)	0.3	0.4	3.0	3.0
Saturation velocity (cm/s)	1x10 <sup>7</sup>	1x10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>7</sup>	2x10 <sup>7</sup>
Thermal conductivity (W/cmK)	1.5	0.5	4.9	1.3

絶縁破壊電界(V/cm)  
 半導体が絶縁性を失わない最大印加可能電界

電子移動度(cm/s / V/cm)  
 低電界での電子の速度 = 移動度 × 電界

飽和電子ドリフト速度(cm/s)  
 高電界では電子速度は飽和して一定値となる

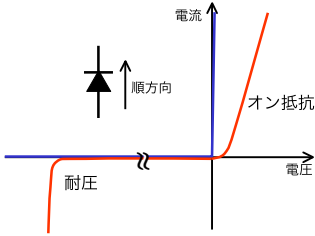
パワーデバイスの耐圧とオン抵抗

理想のダイオード  
 逆方向耐圧 ∞V  
 順方向オン抵抗 0Ω

現実のダイオード  
 それぞれ有限の値を持つ

耐圧: 扱える最大電圧  
 オン抵抗: 損失

耐圧・オン抵抗は何によって決まるのか?  
 耐圧 = 絶縁破壊電界(V/cm) × 厚さ(cm) ÷ 2  
 オン抵抗 = 抵抗率(Ωcm) × 厚さ(cm) ÷ 面積(cm<sup>2</sup>)  
 ... 耐圧向上させるとオン抵抗増加



耐圧とオン抵抗のトレードオフ ショットキーダイオード

Schottky Contact      Ohmic Contact

Si      n<sup>+</sup>

SiC      n      n<sup>+</sup>

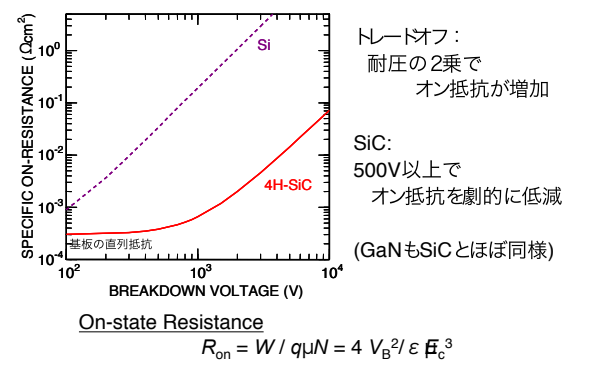
Blocking Voltage;  
 $V_B = (E_C W_D)/2$   
 Carrier Concentration;  
 $N_D = (\epsilon / q)(E_C / W_D) = \epsilon E_C^2 / 2qV_B$   
 On-state Resistance;  
 $R_{on} = W_D / q\mu_n N_D = 4 V_B^2 / \epsilon \mu_n E_C^3$

On-state Resistance  
 $R_{on, SiC} = R_{on, Si} / 400$   
 @same blocking voltage

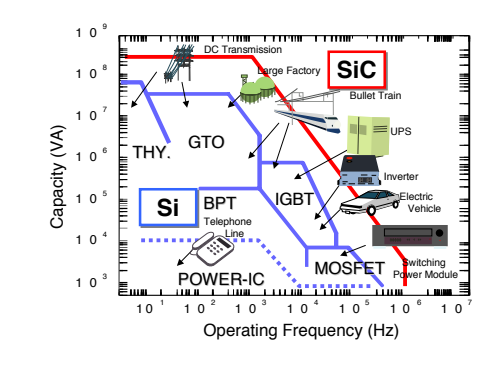
Electric Field

Drift Layer Thickness

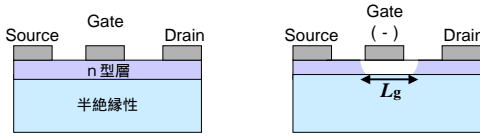
耐圧とオン抵抗のトレードオフ SiとSiCの比較



ワイドギャップ半導体のパワーデバイスへの応用範囲



## 高周波デバイスのパワーと周波数のトレードオフ



動作周波数:

ゲート電圧を変えてからオフ状態になるまでの時間の逆数  
(空乏層のキャリアがすべて流れきるまでの時間)

耐圧:

空乏層内の電界が絶縁破壊電界以下

$$f_T \propto \frac{v_{sat}}{L_g}$$

$$V_B \propto E_c \times L_g$$

周波数と耐圧のトレードオフ

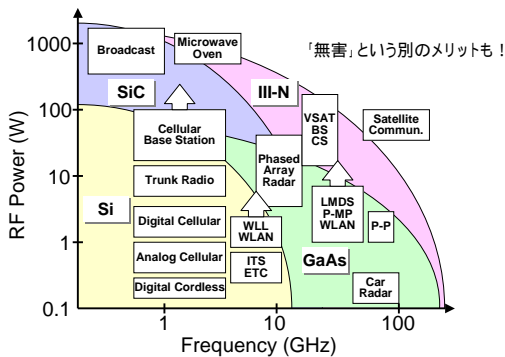
## パワーと周波数のトレードオフ GaAsとSiC,GaNの比較

SiC、GaNの利用で同一周波数で2桁の向上

高周波デバイスは並列化が困難なので、  
パワー向上の効果極めて大

(波長との戦いになる 30GHz ... 1cm)

## ワイドギャップ半導体の高周波デバイスへの応用範囲



## SiC電子デバイスの研究開発

結晶成長技術

バルク結晶成長技術 ウエハー  
エピタキシャル成長技術 デバイス活性層の形成

デバイスプロセス技術

イオン注入 局所的ドーピング  
エッチング技術 デバイス構造の作製  
金属/半導体界面 オミック/ショットキー電極  
酸化膜/半導体界面 MOS構造

## SiC研究の歴史

SiCは30年前から素晴らしい物性を持つことは分かっていた  
ポストGeの有力候補として研究された

しかし、デバイスの基礎となる結晶成長が極めて困難  
あきらめられてしまった材料 SiそしてGaAsへと時代は移る

京都大学における10年前のエピタキシャル成長技術での大きなブレイクスルー  
(同時期にウエハー製造ベンチャー会社(米国Cree社)の立ち上がり)

## Epitaxial Growth (CVD)

Chemical Vapor Deposition

Source gases:  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{H}_2$

Temperature: 1500~1550°C

Growth rate: 3~5  $\mu\text{m}/\text{h}$

Substrates: 8° off-axis 4H-SiC(0001), (000 $\bar{1}$ )

4H-SiC(11 $\bar{2}$ 0) } prepared by slicing  
4H-SiC(03 $\bar{3}$ 8) } [000 $\bar{1}$ ]-grown ingots

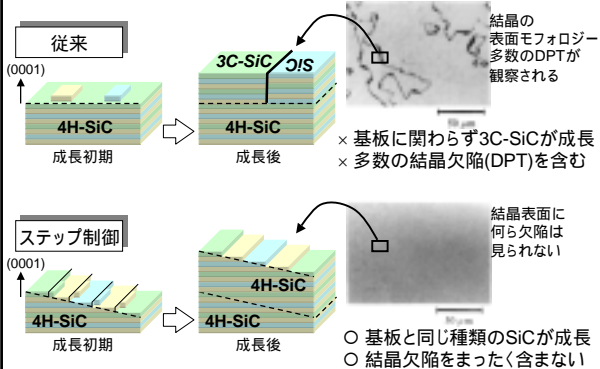
Cold-wall CVD



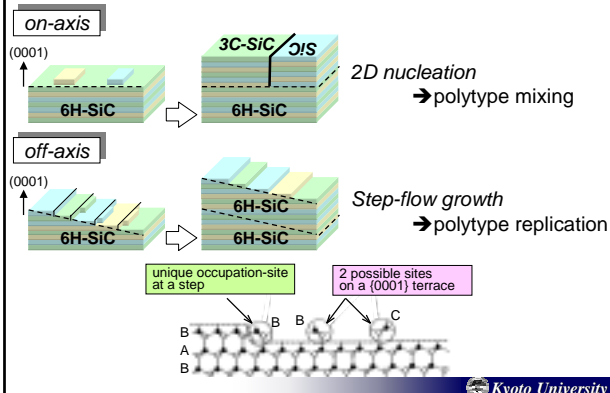
Hot-wall CVD



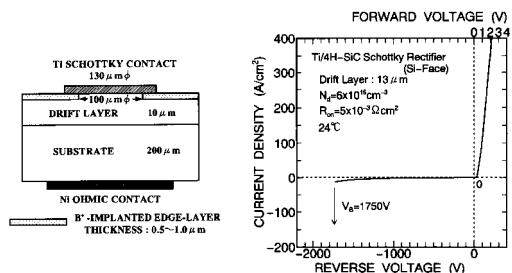
## ステップ制御エピタキシーによるSiCの結晶成長 - 4H-SiC基板上の成長 -



## Concept of Step-controlled Epitaxy

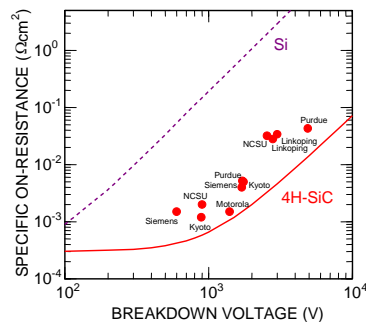


## 1750V SiC Schottky Diode



A. Itoh, T. Kimoto and H. Matsunami,  
Int. Symp. on Power Semiconductor Devices and IC's  
Yokohama, 1995

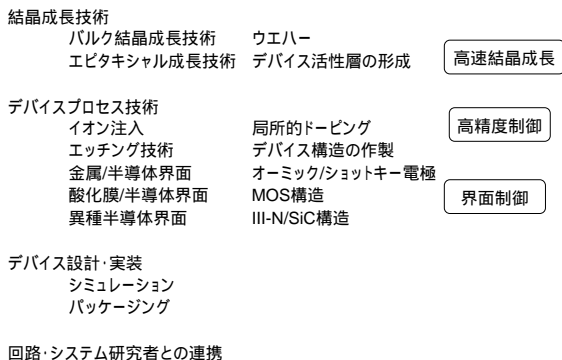
## V<sub>B</sub> vs R<sub>on</sub> - SiC Schottky Diodes



On-state Resistance

$$R_{on} = W / q\mu N = 4 V_B^2 / \epsilon\mu E_c^3$$

## SiC電子デバイスの研究開発 基礎から応用、新展開へ



## ワイドギャップ半導体研究の新たな挑戦

ワイドギャップ半導体  
III族窒化物(III-N)  
シリコンカーバイド(SiC) } 別々に研究

本研究:

界面ナノ構造制御により III-N/SiCの機能融合

↓  
界面機能の発現・応用 各材料での問題点の克服

↓  
**単独材料では実現不可能な高性能デバイスの実現**

## ターゲットとするデバイス

超低損失スイッチングトランジスタ ... SiC MOSFET  
SiO<sub>2</sub>/SiC MOS界面電子移動度が著しく小さい

AINを絶縁層として機能融合  
AIN/SiC MISFET

高出力高周波トランジスタ ... SiC MESFET  
数GHzが実用的な周波数限界

n-GaNを電子エミッタ層として機能融合  
GaN/SiC HBT

MISFET, HBT: 試作例あるが、かえって性能の悪化を招く  
→ ヘテロ界面の問題点の認識が不十分

## SiC (0001)上へのAINのヘテロエピタキシャル成長

### 工学的重要性

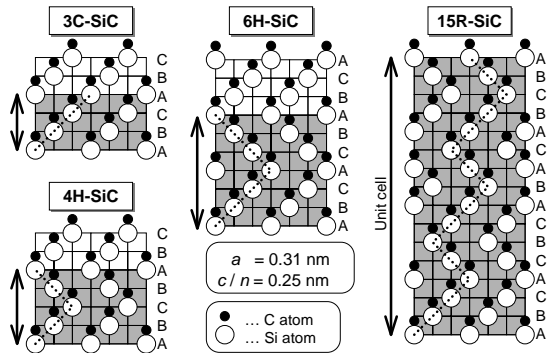
- SiC基板上III-N系デバイスにおけるバッファ層
- SiC系デバイス用新規ゲート絶縁膜 (AIN/SiC機能融合)  
→ 高品質結晶成長が必須

### 結晶成長の観点

結晶系: 有極性六方晶 / 有極性六方晶  
格子不整合: ~0.9%  
ポリタイプ: 2H / 4H (or 6H) ... 不整合  
化学結合: III-V / IV-IV ... 不整合

不整合の解決には、界面制御(構造的・化学的)が極めて重要

## Polytypes of SiC Crystal



## 成長条件および使用基板

### Growth method

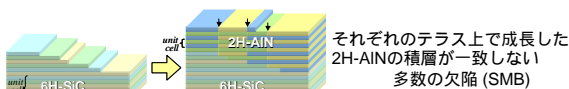
Plasma-assisted MBE  
Elemental Al and Ga  
Active nitrogen (N\*)  
EPI Unibulb rf-plasma cell  
Substrate Temperature  
600~1000°C (T.C.)

### Substrate

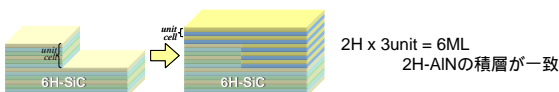
commercially available  
4H-SiC (0001)Si  
6H-SiC (0001)Si  
off-angle: 0.1~0.3°

## ステップ高さ制御によるポリタイプ不整合の回避

2H-AIN      ABABABAB  
6H-SiC      ABCACBABCACB



ステップ高さを1ユニットセル(6ML)に制御

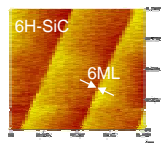


## ステップ高さの制御方法

### SiCエビ技術の活用

ガスエッチングにおけるステップバンチングの形成

HCl/H<sub>2</sub> 1300°C ガスエッチング  
再現性良く6MLステップを実現



### 別の利点:

基板表面の研磨ダメージも同時に除去

### 検証済み:

6MLステップ-テラス構造は  
その後の常温での化学処理に対して安定

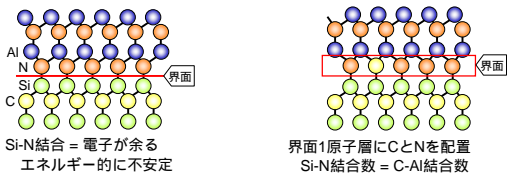
## AlN/SiC 化学結合の不整合

### AlN/SiC界面

界面における化学結合の不整合

大きな界面エネルギー ... 初期に3次元島状成長

→ 結晶性の大幅な劣化



界面の化学状態を積極的に制御することで解決  
まずは、SiC表面状態の把握と制御が必要

## SiC表面状態の制御

### 表面状態の評価

in-situ RHEED

表面超構造

in-situ XPS

表面組成・結合状態

### 表面処理方法

1. HClガスエッチングのみ

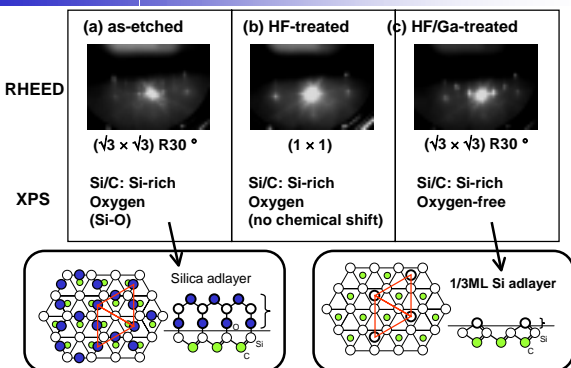
2. HF水溶液処理

3. Ga照射・加熱蒸発プロセス

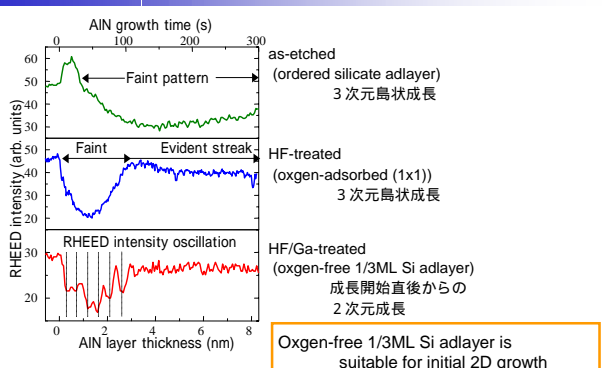
Siで用いられる酸化膜  
除去プロセス

成長(評価)直前に1000°Cでサーマルクリーニング

## 各種処理後のSiC表面状態



## 成長初期からの2次元成長の実現



## RHEED振動消失の原因

### 振動消失の原因

1. 多核成長(3D成長)
2. ステップフローorスパイラル成長

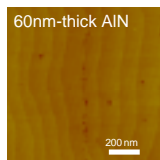
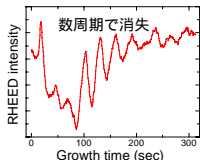
### 実験結果

成長後のAlN表面モフォロジー  
1ML高さのステップ-テラス構造  
テラス上に2D核は無い

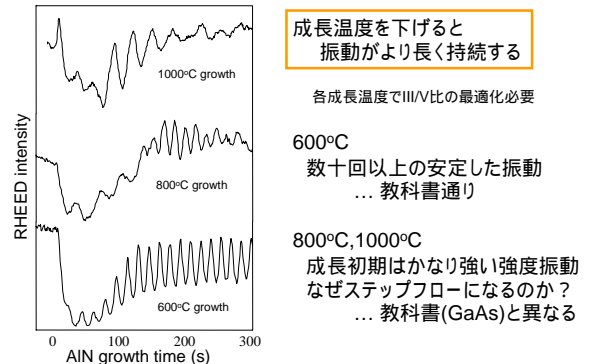


ステップフロー成長が原因

成長温度を下げることで、  
2次元核成長が支配的になるはず

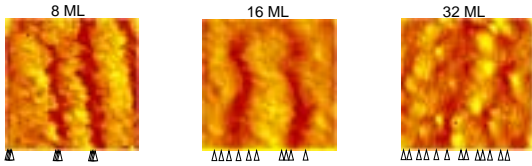


## Growth Mode vs Growth Temperature



## Surface Morphology for Various Thickness

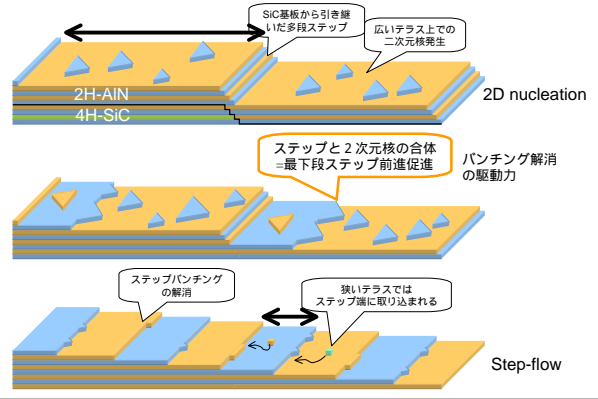
$T_{sub}=800^{\circ}\text{C}$ , on 4H-SiC



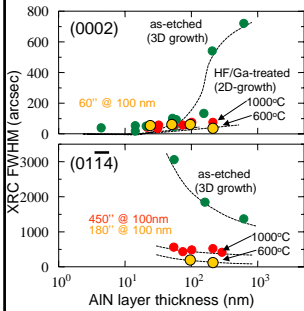
- 4MLステップ
  - 広いテラス幅
  - 三角形の2D核
- 多段ステップの分解  
(バンチングの解消)
- 1MLステップに均一化
  - 2D核見られなくなる

最初は2D成長,膜厚増加でステップフロー成長へ「テラス幅」が変化している

## Model for Growth Evolution



## 成長モードと結晶性



成長開始直後に二次元成長を実現

(0002), (0114)回折  
共に劇的な改善

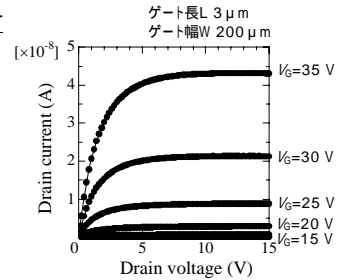
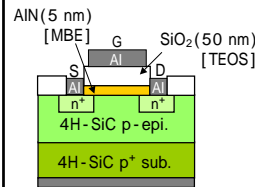
1000°Cよりも600°C成長で  
より結晶性が良好  
特に(0114)回折

- 成長温度を低くした効果
- 二次元成長が持続した効果

1000°Cで過飽和度の高い条件で  
2D成長を持続させる実験が必要

## AlN / 4H - SiC MISFETのデバイス特性評価

### AlN / SiO<sub>2</sub>スタックゲートMISFET



AlN成長条件の改善 + デバイス構造の工夫により

AlN / SiC MISFETの良好なデバイス動作をはじめて実現

## AlNのポリタイプ制御 ~もう一つのアプローチ

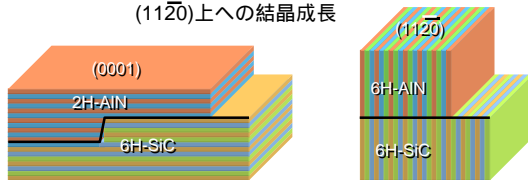
### AlN/SiCのポリタイプ不整合

基板の構造(ステップ高さ)制御により解消

“もう一つのアプローチ”

AlNのポリタイプを基板と一致させる

積層構造をあらわに含む面を用いればよい  
(1120)上への結晶成長



## III-N with non-polar growth direction

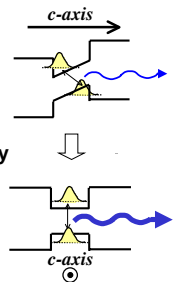
### Spontaneous & piezoelectric polarization along c-axis

Good:  
High density 2DEG in HEMT

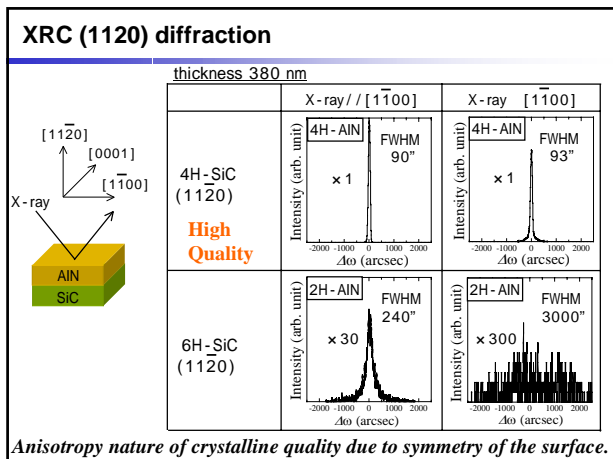
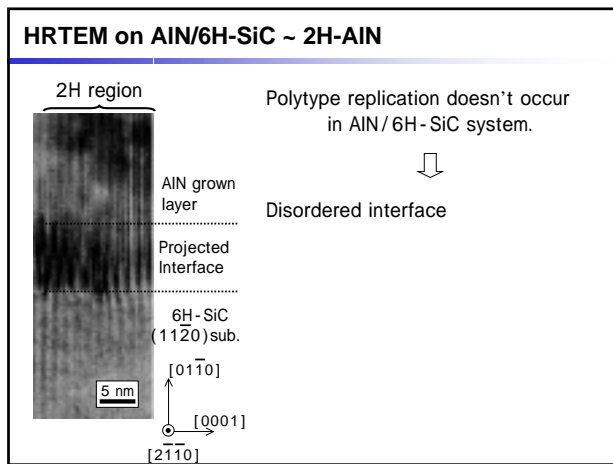
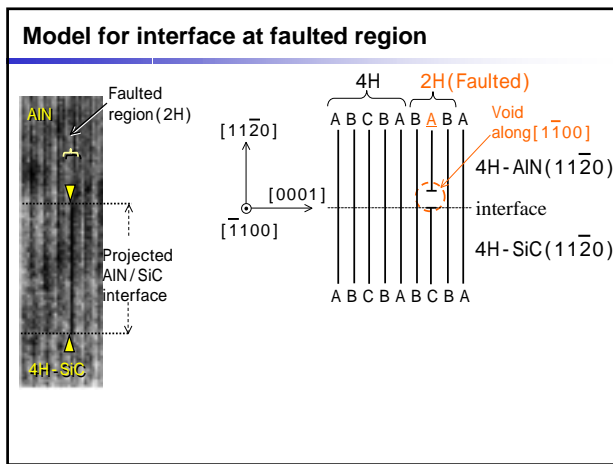
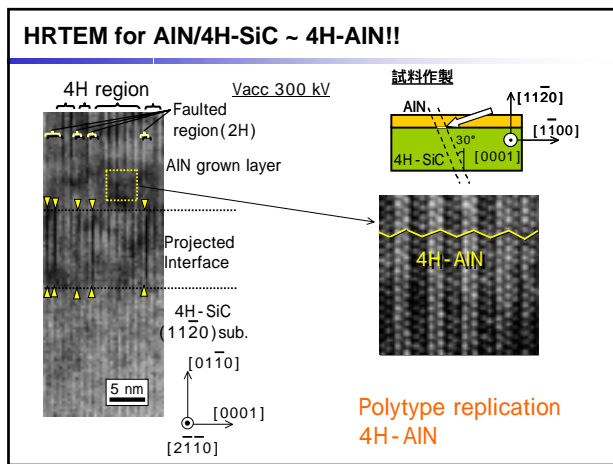
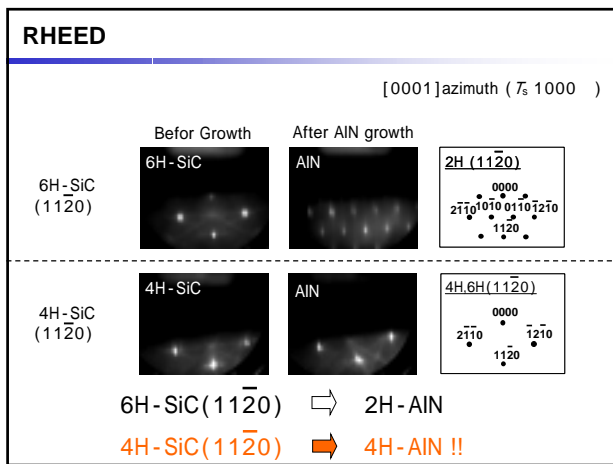
Bad:  
Spatial separation e-h in QW  
resulting in low emission efficiency

Utilizing non-polar growth direction  
such as [11-20] or [1-100]

High quality grown layer is a key  
Choice of substrate and crystal plane







### まとめ ~ ワイドギャップ半導体電子デバイス ~

21世紀の重要産業 IT, PT技術におけるキーデバイス

結晶成長基礎が確立され、優位性の検証は済んだ  
 実用化・高性能化には技術的課題が山積

- \* 基礎から応用に一歩踏み出した研究  
 高速結晶成長、デバイス・プロセス設計
- \* 新しい発想を取り入れた研究  
 異種ワイドギャップ半導体の機能融合

電子デバイスの先も真剣に考え始める時期  
 SiやGaAs系半導体デバイスと異なる特性  
 回路、システム設計を新しい視点で構築  
 高温対応 - 周辺部品・システムの高温対応化

Kvoto University



電気電子基盤技術の展望 4/16 ワイドギャップ半導体 (担当: 須田) レポート問題

2004/4/16

須田 淳

次の3点について論ぜよ。

1. ワイドギャップ半導体の諸物性から1つを選び、その物性が意味する内容を説明し、それがデバイス応用上どのようなメリットになるか具体的に述べよ。

2. 講義では、ワイドギャップ半導体デバイスの期待される応用分野をいくつか紹介した。その中で自分が最も興味深い(もしくは重要)と感じた分野を1つ選び、(1)ワイドギャップ半導体デバイスのどのような特性(特長)がこの応用分野で期待されているか、また、ワイドギャップ半導体デバイスが実用化された時の社会的波及効果を説明せよ。

3. 授業の感想を述べよ。(もっと詳しく知りたかった、難しくて分からなかった、面白かった、つまらなかった点などを具体的に述べるのは大歓迎。)

レポートの左上に「電気電子基盤技術の展望レポート(4/16) 所属専攻 学年 氏名」を忘れずに記入すること。1~3すべて合わせて、A4版1、2ページ(1200字~2000字程度)に収めよ。

以上