

■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ

羽深 等 (横浜国立大学教授)

1. パワー半導体素子
2. 化学結合とパワー半導体
3. 炭化珪素
4. 窒化ガリウム
5. シリコン
6. 酸化ガリウム
7. 結晶の選択

出版が記載されていない図:  
 SiCパワーデバイス最新技術, サイエンス&テクノロジ社(2010)  
 F. Shimura, Semiconductor Silicon Technology, Academic Press

1. パワー半導体素子

半導体素子

対象	情報	電力	光
機能	演算・記憶	制御・変換	発光・受光
電力	小	大	小~中
部品	MPU, RAM	ダイオード, トランジスタ, (パワー半導体)	LED, LD
材料	Si, GaAsなど	Si, SiC, GaNなど	GaP, GaAs, GaN, など

電力変換

交流(直流)を直流(交流)に変換



交流の周波数を変換



電圧を降圧・昇圧

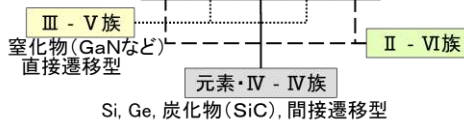


パワー半導体の用途

送電システム	電力損失低減
工場	
電車	インバータの小型・軽量化
自動車	省エネ
太陽電池	パワーコンディショナー高効率化
PC	ACアダプタの小型化→内蔵
サーバー	消費電力削減

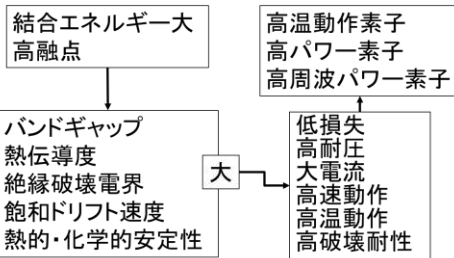
半導体物質

	II	III	IV	V	VI
2	B	C	N	O	
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te

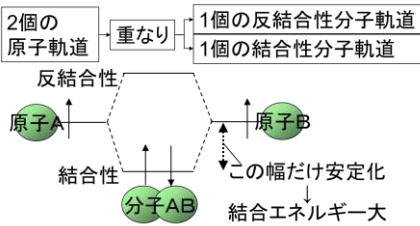


## 2. 化学結合と パワー半導体

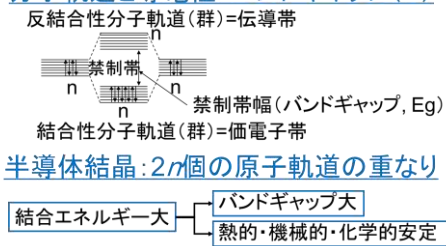
### ワイドバンドギャップ半導体



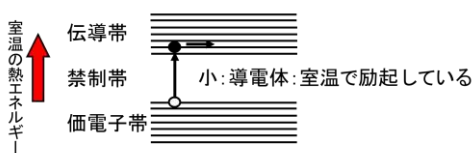
### 分子軌道と導電性・バンドギャップ(1)



### 分子軌道と導電性・バンドギャップ(2)



### 分子軌道と導電性・バンドギャップ(3)



■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

<p><b>分子軌道と導電性・バンドギャップ(3)</b></p> 	
<p><b>分子軌道と導電性・バンドギャップ(3)</b></p> 	
<p><b>ドーピング(電子の動きを変える)</b></p> <p>アクセプタ (Si中にB)          空の軌道(を持つ元素)を導入</p>  <p>励起:          価電子帯に空軌道(正孔)生成</p> <p>孔を埋めながら電子が移動          (一見)正孔が移動:p型半導体</p>	
<p><b>ドーピング(電子の動きを変える)</b></p> <p>ドナー(Si中にP, As, Sb)          電子(を余分に持つ元素)を導入</p>  <p>励起: 伝導帯に電子</p> <p>電子が移動:n型半導体</p>	
<p><b>バンドギャップと絶縁破壊強度</b></p> <p>バンドギャップ:大</p> <p>電子 - 正孔対の生成(励起)には大きなエネルギー</p> <p>衝突電離現象*によるアバランシェ破壊が起こりにくい</p> <p>絶縁破壊しにくい</p> <p>*:自由電子が電界で加速され衝突電離を引起す過程</p>	

■ A4 【Si, SiC, GaN 等の結晶とウエハ】 羽深講師 Ver.03

<p>バンドギャップ</p> <p>大</p> <p>小</p> <p>バンドギャップとアバランシェ現象</p>	
<p>www.fbi-award.jp/sentanjusyou201310          ・酸化ガリウムの新規ワイドギャップ半導体としての電子デバイス応用へ向けた技術開発課題          低炭素社会戦略センター</p> <p>絶縁破壊電界 (MV/cm)</p> <p>バンドギャップ (eV)</p> <p><math>\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3</math> 5.3 eV (推定)</p> <p>半導体の絶縁破壊電界とバンドギャップ</p>	
<p>適性: 電流を沢山流せる材料・構造          特徴: 電流が本体を通過→通り易いこと          電圧をかけても壊れない          電子が通り易い(抵抗・損失)</p> <p>デバイス</p> <p>e-通過</p> <p>パワーデバイスに適する材料</p>	
<p>デバイスの単位面積当たりのオン抵抗</p> $R_{\text{onS}} \propto \frac{1}{\epsilon_s \mu_n E_C^3}$ <p>半導体の比誘電率      最大絶縁破壊電界強度      電子移動度</p> <p>松波ら、半導体SiC技術と応用 第2版、日刊工業出版(2011)</p>	
<p>1周期のスイッチングの間にデバイスで発生する全電力損失</p> $P_T = P_{\text{on}} + P_{\text{SW(on)}} + P_{\text{SW(off)}}$ <p>導通損失    ON時、OFF時のスイッチング損失</p> <p>松波ら、半導体SiC技術と応用 第2版、日刊工業出版(2011)</p>	

■ A4 【Si, SiC, GaN 等の結晶とウエハ】 羽深講師 Ver.03

$P_{on}$ : 導通損失

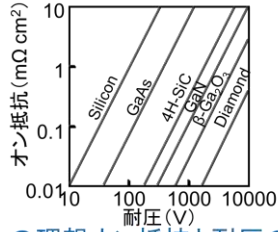
$$P_{on} \propto \sqrt{\frac{1}{\epsilon_s \mu_n E_C^3}}$$

$P_{SW(on),(off)}$ : ON、OFF時スイッチング損失  
 空間電荷層の蓄積電荷  $Q_s$  の充放電  
 によってのみ発生(仮定)

$$Q_s \propto \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\mu_n E_C^3}}$$

$\epsilon_s$ : 半導体の比誘電率  
 $\mu_n$ : 電子移動度  
 $E_C$ : 最大絶縁破壊電界強度

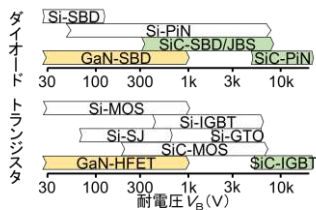
松波ら、半導体SiC技術と応用 第2版、日刊工業出版(2011)



半導体の理想オン抵抗と耐圧の関係

半導体材料の物性値

	Si	4H-SiC	GaN	$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
バンドギャップ(eV)	1.1	3.3	3.4	4.8-4.9
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	1400	1000	1200	300(推定)
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	2.5	3.3	8(推定)
比誘電率(-)	11.8	9.7	9.0	10
バリア性能指数(Si比) $\epsilon_s \mu_n E_C^3$	1	340	870	3444
熱伝導率(W/(mK))	150	500	200	13



パワーデバイスの電圧領域  
 NEDO省エネルギー技術フォーラム2013.11.1 より

比較: SiC-on-SiC vs GaN-on-Si

GaN: 電子移動度大 → 高周波

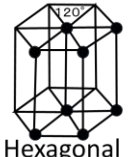
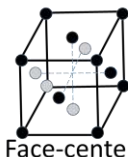
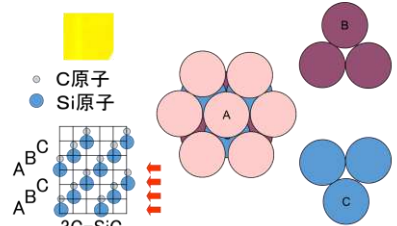
SiC: 熱伝導度大 → 高電力密度

電圧: SiC-on-SiC > 600V > GaN-on-Si

使用温度: SiC-on-SiC > GaN-on-Si

F. Iacopi et al., MRS Bulletin, 40,390-398 (2015).

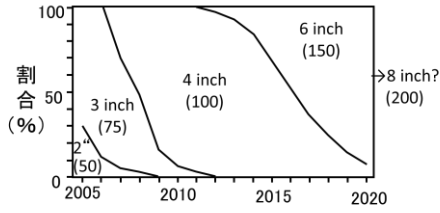
■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

<p>SiCユニポーラデバイス: 600V~6kV級で魅力              SiC SBDが、Si PINダイオードを置き換え              SiC パワー-MOSFETがSi SJMOSFET、IGBTの一部を置き換え              SiCバイポーラデバイス: 10kV以上の超高耐圧应用到魅力              低耐圧: 500V以下: AlGaIn/GaN系がSiと競合              600V級: 以下が競合              Si SJMOSFET, Si IGBT,              SiCパワー-MOSFET, AlGaIn/GaN HFET</p> <p style="text-align: right;"><small>学振145委員会152回研究会(2017)</small></p>	
<p>SiCデバイスが使われた主な製品              情報機器用電源              太陽電池用パワコン              空調機              急速充電機              高周波誘導加熱用電源              高速エレベータ              電車</p> <p style="text-align: right;"><small>学振145委員会152回研究会(2017)</small></p>	
<h2>3. 炭化珪素</h2> <p>(Silicon Carbide)</p>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Hexagonal</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>最密充填</p>  <p>Face-centered Cubic</p> </div> </div> <p style="text-align: center;"><b>ブラベー格子</b> Cubic (C)とHexagonal (H)</p>	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>● C原子</p> <p>● Si原子</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>3C-SiCの結晶構造</p> </div> </div>	

■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

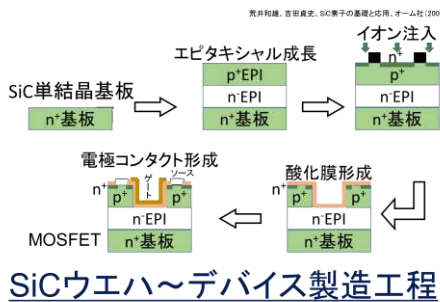
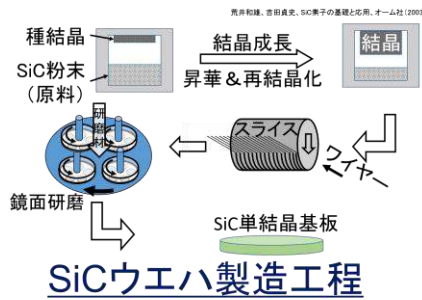
 <p>● C原子 ● Si原子</p> <p>A B C A B C A B C</p> <p>4H-SiC</p> <p><b>4H-SiCの結晶構造</b></p>										
 <p>A B C B A</p> <p><b>4H-SiCの結晶構造</b></p>										
<p><b>SiC結晶塊生産技術</b></p>										
<p>低抵抗率基板</p> <p>エピタキシャル膜形成</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>素子耐電圧</th> <th>膜厚</th> <th>ドーピング密度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1kV</td> <td>10 μm</td> <td>1x10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup></td> </tr> <tr> <td>10kV</td> <td>100 μm</td> <td>5x10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup></td> </tr> </tbody> </table> <p>欠陥密度 0.1cm<sup>-2</sup>以下</p> <p>課題: 膜厚とドーピングの均一性          低欠陥密度          生産性(高成長速度など)</p> <p>デバイス作製</p>	素子耐電圧	膜厚	ドーピング密度	1kV	10 μm	1x10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup>	10kV	100 μm	5x10 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup>	
素子耐電圧	膜厚	ドーピング密度								
1kV	10 μm	1x10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup>								
10kV	100 μm	5x10 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup>								
 <p>種結晶 結晶(2200°C) 数10Torr Si<sub>2</sub>C Si SiC<sub>2</sub> 原料 (2500°C)</p> <p>不活性ガスにより原料を効率良く輸送</p> <p>10mm</p> <p>松波弘之、半導体SiC技術と応用、日刊工業新聞(2003)</p> <p><b>SiC結晶塊生産技術:改良Lely法</b></p>										

■ A4 【Si, SiC, GaN 等の結晶とウエハ】 羽深講師 Ver.03

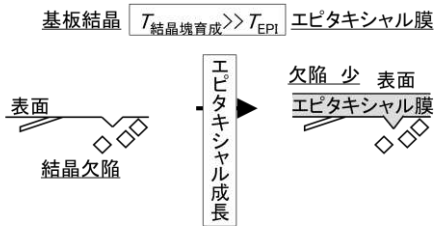


パワーデバイス用SiCウエハの直径

NE先端テクノロジーフォーラム「次世代パワー半導体のインパクト」20170730資料



SiCエピタキシャル  
成長技術



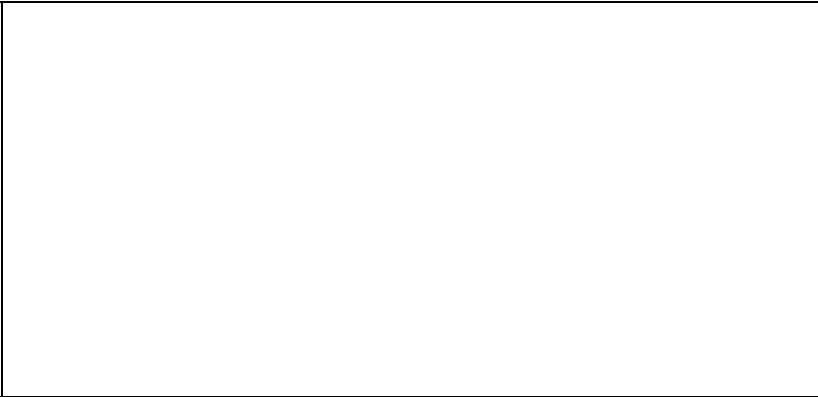


■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

 <p>気相エピタキシャル成長法</p>	
<p><b>エピ成長の多形制御</b></p> <p>1500~1600°Cでは、立方晶(3C)が安定          4H基板使用時でも3Cの混入あり</p> <p>↓</p> <p>ステップフロー制御エピタキシー(京大・松波)          表面を数度傾けた基板</p>	
<p>松波弘之、半導体SiC技術と応用、日刊工業新聞(2003)</p>  <p>SiCエピタキシャル成長機構:表面</p>	
<p><b>SiCエピタキシャル成長の課題</b></p> <p>低コスト化</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 低オフ角度(1度以下)基板への成長</li> <li>2. 高速成長</li> <li>3. 結晶欠陥</li> </ol>	
<p>エピ</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 低オフ角度基板             <ol style="list-style-type: none"> <li>1-1. 欠陥低減</li> <li>1-2. 結晶塊切断時の材料損失の低減</li> <li>1-3. ステップバンチング</li> </ol> </li> </ol>	

■ A4 【Si, SiC, GaN 等の結晶とウエハ】 羽深講師 Ver.03

**1-1. エピ層の欠陥低減**  
 (0001)面内の基底面転位  
 →オフ基板ではエピ層に引き継がれる(その量は、オフ角度の大きさに比例)  
 →デバイス特性に悪影響  
 例  
 ・pinダイオードで順方向電圧劣化  
 ・MOSTランジスタで酸化膜信頼性低下  
**基底面転位を貫通刃状転位(比較的無害)に変換(ほぼ完全に変換可能)**



学振145委員会152回研究会

TSD→TSD (>99%)	TSD→Frank SFs (<1%)	BPD→BPD (<5%)	BPD→TED (>95%)
----------------	---------------------	---------------	----------------

TSD: threading screw dislocation (貫通刃状転位)  
 TED: threading edge dislocation (貫通らせん転位)  
 BPD: basal plane dislocation (基底面転位)

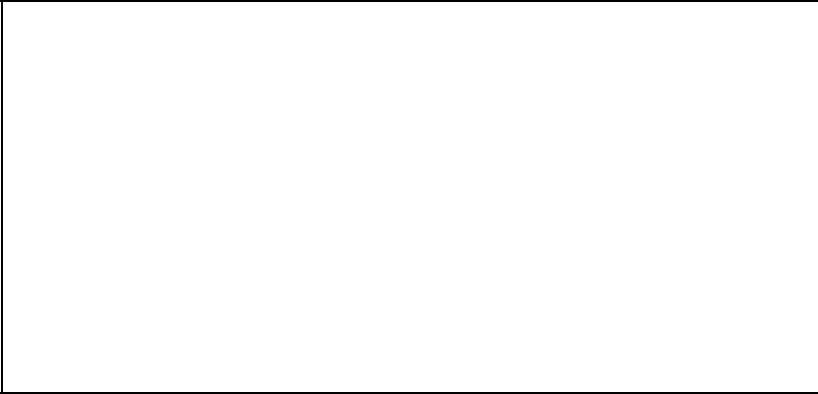
TED→TED (~100%) <0001>

**SiCエピ成長における転位引き継ぎ**

**SiCエピウエハの欠陥の種類、密度、影響**

欠陥の種類	密度 (cm <sup>-2</sup> )
TSD	500
TED	3000
BPD	0.1
In-grown Stacking Fault	0.1
Carrot, Triangular	0.2
Down-fall	0.3

学振145委員会152回研究会



**SiCエピウエハの欠陥の種類、密度、影響**

欠陥の種類	デバイス			
	SBD	MOSFET	JFET	Pin/Thyristor
TSD (no pit)	N	N	N	N (local lifetime reduction)
TED (no pit)	N	N	N	N (local lifetime reduction)
BPD (incl. 1D, half loop)	N	N	N	Y (degradation)
In-grown SF	Y	Y (body diode)	Y (body diode)	Y
Carrot, Triangular	Y	Y	Y	Y
Down-fall	Y	Y	Y	Y

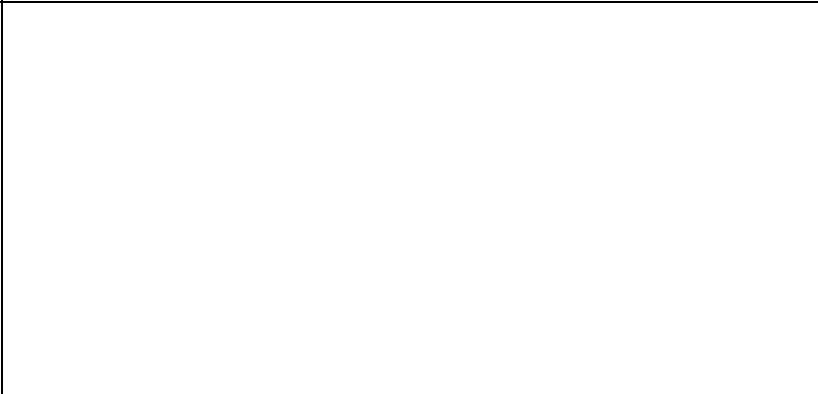
Y: YES (影響あり), N: negligibly small (影響些少)  
 学振145委員会152回研究会



**1-2. 結晶塊切断時の材料損失の低減**

オフアングル  
 0度 4度 8度

結晶塊からウエハを切り出す際の無駄



■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

1-3. エピ膜の表面:ステップ



ステップバンチング  
松波ほか、半導体SiC技術と応用、日刊工業新聞社(2011)

2. 高速成長

現状: 3インチ基板に数 $\mu\text{m}/\text{分}$

高速化の理由:

- ・コストダウン(シリコンの数十倍)
- ・高耐压用デバイスに厚膜エピが必要  
 10kV級には約100 $\mu\text{m}$ の厚さが必要

高速化の方法

1. 高温化
2. 化学反応系
3. 成長装置

1. 高温化

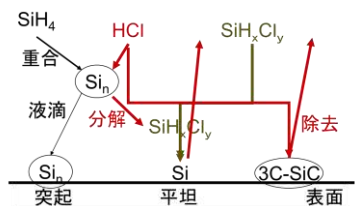
原料濃度→大

ステップフロー制御(二次元核生成抑制)には高温を要する



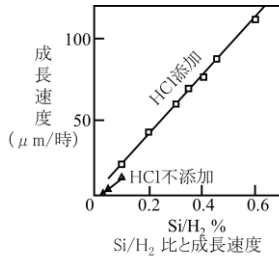
1500~1600 $^{\circ}\text{C}$ に

2. 化学反応系



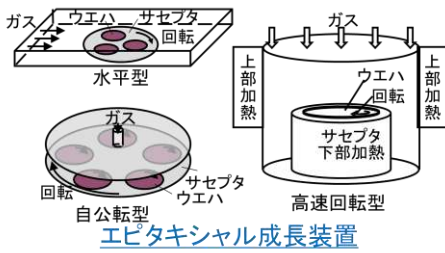
塩素系ガスの採用: 成長速度増大

■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03



HClガス添加による成長速度増大

3. 成長装置



エピタキシャル成長装置

4. GaN結晶

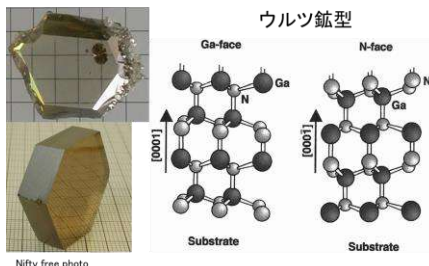
窒化物(GaN)系半導体の特徴

1. バンドギャップが大きい(3.4 eV)
2. 絶縁破壊電界が大きい
3. 飽和速度が大きい
4. ヘテロ構造(AIGaN/GaNなど)が使われる
5. シートキャリア密度が大きい

窒化物(GaN)系半導体の応用分野

1. 発光素子(LED, LD)
2. 高周波・高出力・高温動作の電子デバイス
3. 紫外線センサー
4. 超高効率太陽電池

窒化ガリウム(GaN)



■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

AlGaIn/GaNのヘテロ構造を利用した高周波デバイスの例

GaNの持つピエゾ効果によりヘテロ界面に発生する高密度の2次元電子ガス\*

\*: 半導体中で二次元状に電子が分布する状態を示す。半導体同士や半導体と絶縁体の接合等で低濃度で調整を作り、電圧やレーザーの調整により、フェルミ準位が低濃度より高くなる状態にすること。この領域では、半導体中に電子が充満する。これを電子ガスといひ、これが通常、二次元状に分布するため、二次元電子ガスと言う。

応用物理学会シリコンテクノロジー分科会 第203回2017年11月16日

ノーマリオフゲート構造  
 反転ゲート、p-GaNゲート?  
 トレンチ加工、ゲート絶縁膜

p-ボンド形成  
 イオン注入、低濃度Mgドーピング

ドリフト層  
 低キャリア濃度制御 (<math>10^{16}</math> cm<sup>-3</sup>)  
 高移動度

GaN基板  
 高品質、低抵抗、低コスト

縦型GaNデバイス作製の課題

GaN エピタキシャル成長 回路形成

## GaN結晶～デバイス 工程

### GaNエピタキシャル成長用基板結晶

基板の種類	基板の条件(問題点)
炭化珪素	格子定数 → 結晶欠陥(転位)
サファイア	熱膨張率 → 反り → 割れ
シリコン	熱伝導率
窒化ガリウム	値段

### エピタキシャル成長用基板の条件

格子定数

大欠陥

小欠陥

格子定数と結晶欠陥

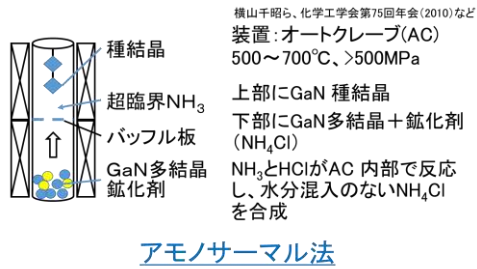
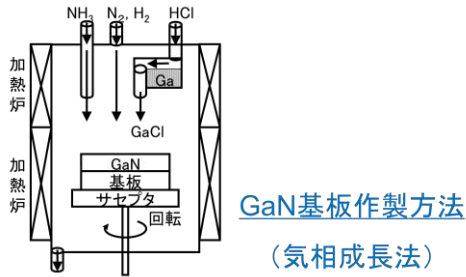
■ A4 【Si, SiC, GaN 等の結晶とウエハ】 羽深講師 Ver.03

<p>エピタキシャル成長用基板の条件</p>  <p>熱膨張率と反り</p>	
<p>エピタキシャル成長用基板の条件</p>  <p>基板の熱伝導</p>	
<p>エピタキシャル成長用基板の条件</p>  <p>基板の熱伝導</p>	
 <p>GaN膜との格子不整合と熱膨張係数</p> <p><small>元木健作, S E I テクニカルレビュー, 第175号, 10-18頁 (2009年7月)</small></p>	
<p>GaNエピ成長用単結晶基板の特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>GaN: 正確な格子整合・大きな基板無し</li> <li>SiC: 格子不整合率小(3%)・高価</li> <li>サファイア: 安価・熱伝導性小・格子不整合率大</li> <li>シリコン: GaNに対して格子整合性が悪い・主にAlGaNからなる厚いバッファ層を形成</li> </ul>	

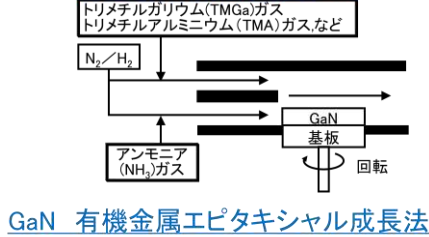
■ A4 【Si, SiC, GaN 等の結晶とウエハ】 羽深講師 Ver.03

GaNエピ成長用単結晶基板の特徴

- GaN: 正確な格子整合・大きな基板無し
- SiC: 格子不整合率小(3%)・高価
- サファイア: 安価・熱伝導性小・格子不整合率大
- シリコン: GaNに対して格子整合性が悪い・主にAlGaNからなる厚いバッファ層を形成



GaN電子回路形成用薄膜形成



5. シリコン(Si)

重要な特徴:  
 無転位結晶  
 最先端(超微細)プロセス技術  
 技術者数膨大



■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

<p><b>シリコンウエハ生産工程</b></p> <p>珪石          ↓C,還元          金属珪素 不純物 多          ↓HCl          トリクロロシラン, SiHCl<sub>3</sub>          ↓気相・表面反応(CVD) 高純度          多結晶 (11N) 方位雑多          ↓融かして引上げ 粒界無数          単結晶 単一方位          ↓切出・研磨 高純度          半導体シリコンウエハ</p>   <p>Yahoo Free Photo</p>	
<p><b>シリコン単結晶引上げ法 (チョクラルスキー(CZ)法)</b></p>   <p>シリコン結晶塊</p>	
 <p>多結晶溶解 種付け 引上げ開始 引上げ 引上げ終了</p> <p><b>シリコン単結晶引上げ法(チョクラルスキー法)</b></p>	
 <p>結晶塊</p> <p>ワイヤー</p> <p><b>ウエハに切り出し:ワイヤーソー</b></p>	
 <p>ウエーハを接着したプレート を押し付けて回転 研磨布付き定盤 研磨材を供給</p> <p><b>鏡面研磨: 化学的機械的研磨</b> Chemical Mechanical Polish, CMP</p>	



■ A4【Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ】羽深講師 Ver.03

水・薬液

ウエハ

バッチ式洗浄

ウエハ

ノズル

水・薬液

枚葉式洗浄

**湿式ウエハ洗浄**

原料ガス  
 $\text{SiHCl}_3$   
 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$   
 $\text{SiH}_4$ など

化学反応

Si

基板(高温)

シリコン結晶薄膜  
 (エピタキシャル膜)

基板(高温)

**シリコンエピタキシャル成膜**

CZ ウエハ

表面

欠陥

析出物

空洞 (COP)

エピ成長

エピウエハ

低欠陥 表面

エピタキシャル膜

種々の伝導型の組合せを自在に作れる

エピタキシャル成長による表層欠陥の消滅

**エピタキシャル膜を使う理由**

ウエハ

洗浄

成膜

レジスト塗布

露光

現像

エッチング

不純物注入

レジスト剥離

前工程 (電子回路形成)

後工程: 検査・実装・組み立て

**シリコンウエハ上に電子回路形成**

6. 酸化ガリウム

	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (4.3-4.5 eV)	$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (5.3 eV)
結晶塊	エピ膜	結晶塊
製法	EFG、CZ、FZ	なし
特徴	融点~1800°C 15mm/hr (EFG) 転位密度 ~10 <sup>4</sup> cm <sup>-2</sup> 2"φウエハあり	HVPE、MOCVD、MBE
	(001)ウエーハ上のホモエピ 1000°C付近で平滑成長 5μm/hr (HVPE)	バルク結晶成長困難
		大気圧 ~500°Cのサファイヤ 4"φ基板 上へテロエピ

<p style="text-align: center;"><b>7. 結晶の選択</b></p> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">結晶</th> <th>課題</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SiC</td> <td>酸化膜・酸化膜／半導体界面、結晶欠陥(転位)、基板結晶(値段・質)</td> </tr> <tr> <td>GaN</td> <td>酸化膜・酸化膜／半導体界面、結晶欠陥(転位)、基板結晶(値段・質)</td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>抵抗率・厚さの管理、ライフタイム、遷移幅など</td> </tr> <tr> <td>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></td> <td>結晶育成方法、結晶加工方法、結晶評価方法</td> </tr> </tbody> </table>	結晶	課題	SiC	酸化膜・酸化膜／半導体界面、結晶欠陥(転位)、基板結晶(値段・質)	GaN	酸化膜・酸化膜／半導体界面、結晶欠陥(転位)、基板結晶(値段・質)	Si	抵抗率・厚さの管理、ライフタイム、遷移幅など	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	結晶育成方法、結晶加工方法、結晶評価方法	
結晶	課題										
SiC	酸化膜・酸化膜／半導体界面、結晶欠陥(転位)、基板結晶(値段・質)										
GaN	酸化膜・酸化膜／半導体界面、結晶欠陥(転位)、基板結晶(値段・質)										
Si	抵抗率・厚さの管理、ライフタイム、遷移幅など										
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	結晶育成方法、結晶加工方法、結晶評価方法										
<p style="text-align: center;"><b>材料を選ぶ条件(1)</b></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>1. コスト</td> </tr> <tr> <td>2. 信頼性</td> </tr> <tr> <td>3. 性能</td> </tr> </table> <p>性能が良いに越したことはないが、値段が最優先。          高コスト(量産性のない)半導体は主役になれない。          但し、信頼性は必要。</p> <p><small>半導体産業新聞セミナー「本当はどうか? SiC/GaNパワーデバイスの本格量産」より          山本秀和、化学工学会CVD反応分科会第24回シンポジウム(2015.12)より</small></p>	1. コスト	2. 信頼性	3. 性能								
1. コスト											
2. 信頼性											
3. 性能											
<p style="text-align: center;"><b>材料を選ぶ条件(2)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・使うのは化合物群(半導体、酸化物、窒化物、塩化物、フッ化物、など) &amp; 総合物性(化学的・物理的・電気的)</li> <li>・生産に関わる化学反応全般が、容易であること。</li> <li>・電子を沢山流せる・しっかり止められる              (ドーピング可能・絶縁膜形成可能・酸化膜／半導体界面形成可能)</li> <li>・半導体プロセスに耐えられる硬さ</li> <li>・材料: 2元の難しさは単元素半導体の4倍以上</li> <li>・Siで可能な用途では、他の材料が置き換われない。</li> <li>・Si=最先端材料: 種々の材料がSi技術の歴史を追う。</li> </ul>											
<p style="text-align: center;"><b>Si, SiC, GaN等の結晶とウエハ</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. パワー半導体素子</li> <li>2. 化学結合とパワー半導体</li> <li>3. 炭化珪素</li> <li>4. 窒化ガリウム</li> <li>5. ケイ素</li> <li>6. 酸化ガリウム</li> <li>7. 結晶の選択</li> </ol>											