

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発  
—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長  
技術の開発」(中間評価)

(2007年度～2011年度 5年間)  
プロジェクトの詳細(公開)

研究開発項目①  
「高品質大口径単結晶基板の開発」

2009年 8月31日

サブリーダー

大阪大学 教授 森勇介

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」  
(中間評価)第1回分科会 資料7

1/89

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発の内容

公開

- (1) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討
  - ・溶液状態・核発生・成長方位・転位制御技術
- (2) 大口径種結晶の開発
  - ・各種無極性種基板結晶育成技術
- (3) 高導電性窒化物単結晶基板の開発
  - ・Ge添加による高導電性GaN結晶育成
- (4) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発
  - ・Zn添加による高抵抗GaN結晶育成

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(中間目標の達成度)

公開

## (1) 目標と達成状況

	最終目標	中間目標	成果	中間目標達成度	最終目標達成の課題
1) 有極性基板	4インチ 転位密度 $< 5 \times 10^3 \text{cm}^{-2}$	2インチ 転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$	2インチφ基板 上において $10^4 \text{cm}^{-2} \sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ 台	○	溶液攪拌条件の検討 による結晶品の 均一化
2) 無極性基板	3~4インチ 転位密度 $< 10^5 \text{cm}^{-2}$ 積層欠陥密度 $< 10^3 \text{cm}^{-1}$	最適育成 条件の検討 転位密度 $< 10^6 \text{cm}^{-2}$	$< 10^6 \text{cm}^{-2}$	○	高品質無極性GaN結 晶育成に必要な種基 板結晶の作製
3) 導電性基板	比抵抗 $< 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	比抵抗 $< 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$	$2 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$	◎	Geの高濃度・均一添 加
4) 高抵抗基板	比抵抗 $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$	比抵抗 $> 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$	$10^8 \Omega \cdot \text{cm}$	◎	Znの均一添加
5) 大口径化技術		3インチ及び4イ ンチ結晶大型化 に必要な要素技 術	4軸揺動機 構の開発	◎	大口径高品質種基板 結晶の作製  溶攪拌条件の最適化

◎: 当初計画以上の成果 ○: 今年度達成・達成見込み △: 来年度以降

3/89

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(中間目標と達成度)

公開

## 溶液状態・核発生・成長方位・転位制御技術の開発による高品質GaN結晶育成

- ・転位密度が $10^4 \text{cm}^{-2} \sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ 台の高品質2インチφ有極性GaN結晶を実現  
**(世界初)**
- ・無極性GaN結晶において転位密度が $10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下を実現  
**(Naフラックス法で世界初)**
- ・新型揺動装置により4インチφ基板を用いたGaN結晶育成に成功  
**(液相成長法で世界初)**

## 不純物添加による伝導性制御に成功

- ・Geを導入( $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )し、高導電性化( $0.017 \Omega \cdot \text{cm}$ )を実現  
**(Naフラックス法で世界初)**
- ・Znを導入( $\sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ )し、高抵抗化( $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ )を実現  
**(Naフラックス法で世界初)**

4/89

### 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」 研究開発成果について(研究開発計画)

公開

目的・意義	窒化物単結晶基板を成長するには HVPE法や Na系フラックス溶液成長法、昇華法等が知られているが、現状電子デバイス用の高品質な結晶性を持つ大口径単結晶基板の育成は実現されていない。そこで本研究開発では、窒化物半導体電子デバイス作製に必要とされる4インチ級の究極的高品質有極性バルク単結晶、及び無極性バルク単結晶を育成する技術を開発し、Siデバイスと同等、或いはそれ以上の安定性を有する高出力デバイスの実用化に資する。
①H21中間目標 ②最終年度目標	①2インチ単結晶有極性面:転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 、無極性:転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 導電性基板では比抵抗 $<10^{-1}\Omega\cdot\text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^5\Omega\cdot\text{cm}$ の基板を実現する。同時に3インチ及び4インチ結晶大型化に必要な要素技術を明らかにする。 ②4インチ有極性単結晶基板、及び3~4インチ無極性単結晶基板を実現し、前者では転位密度 $<5\times 10^6\text{cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $<10^6\text{cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3\text{cm}^{-1}$ の特性を得る。導電性基板で比抵抗 $<10^{-2}\Omega\cdot\text{cm}$ 、高抵抗基板で比抵抗 $>10^5\Omega\cdot\text{cm}$ の特性を得る。

		平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22-23年度
窒化物単結晶成長における基礎技術の検討	溶液状態制御技術	シミュレーションによる解析・大型装置開発	大型装置による溶液攪拌条件の検討	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(Φ2インチ)	大型装置による溶液攪拌条件の最適化(Φ3~4インチ)
	核発生・成長方位・転位制御技術	炭素・Sr添加条件検討	炭素・Sr添加条件検討	炭素・Sr添加条件最適化	炭素添加条件最適化
大口径種基板の開発	大口径成長技術	バッファ層の工夫 10mm□程度	下地結晶の拡大 Φ1インチ程度	残留歪低減 Φ2インチ	Φ3~4インチ
	Naフラックス法に適したGaN種結晶の作成技術	結晶性評価 (断面TEM等)	低減手法検討 (横方向成長等)	低減手法最適化 転位 $<10^9\text{cm}^{-1}$	
		SIMS評価	反応管等改善 不純 $<5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$		

5/89

### 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」 研究開発成果について(研究開発計画)

公開

		平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22-23年度
高導電性単結晶基板の開発	導電性制御技術	・無極性GaN育成条件検討 ・不純物添加検討		・高純度化検討 ・育成条件最適化	
	大口径化技術	・大型化基礎検討 新大型炉導入	・育成条件最適化	大型無極性・高導電性結晶作製検討	
	エピタキシャル成長用基板開発		エピG、評価Gへ供給/フィードバック 1cm□	2インチ□	
高抵抗性単結晶基板の開発	導電性制御技術	・無極性GaN育成条件検討 ・不純物添加検討		・高純度化検討 ・育成条件最適化	
	大口径化技術	・大型化基礎検討	・育成条件最適化	大型無極性・高抵抗性結晶作製検討 大型化装置導入	
	エピタキシャル成長用基板開発		エピG、評価Gへ供給/フィードバック 1cm□	2インチ□	

6/89

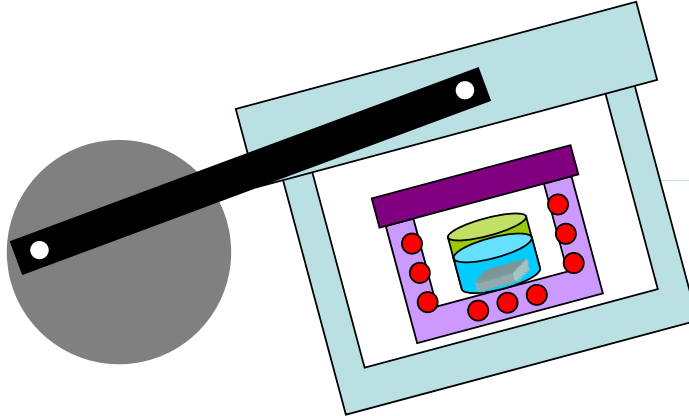
## 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

## 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開

(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討  
(溶液状態・核発生・成長方位・転位制御技術の開発)

機械式揺動による溶液攪拌の効果を検証



- ・流体シミュレーション(Fluent)による流速計算
- ・揺動の有無によるGaN結晶表面モフォロジー比較

7/89

## 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

## 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

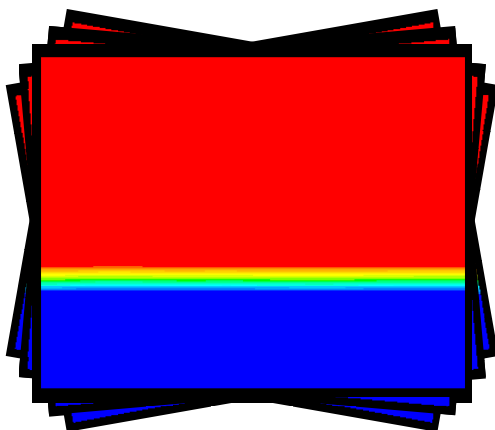
公開

φ66 2inch基板底置き

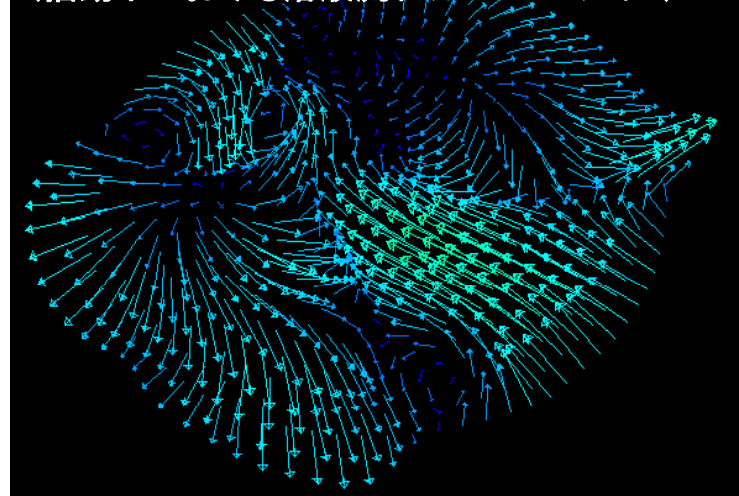
揺動周期: 1rpm

揺動角度: 10°

温度差: なし



## (揺動下における溶液流れシミュレーション)



流速= ~2cm/s

揺動により、基板表面に均一な流れが発生し周期的に変化  
 基板表面の溶液流速は揺動なしの約30倍(~2cm/s)  
 基板の設置条件(角度等)にも流速は依存

8/89

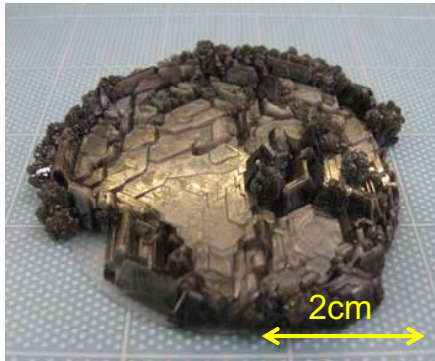
## 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

## 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

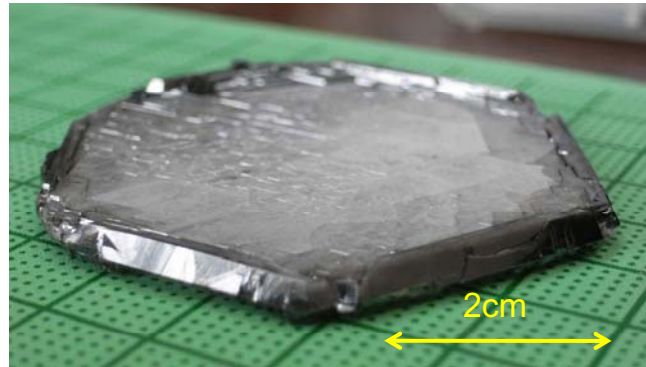
公開

(揺動下におけるGaN結晶のモフォロジー)

育成条件: 860°C、45atm、96時間



揺動無し



揺動有り(1rpm)

揺動無し⇒基板端部に異常成長、平坦性が低い

揺動有り⇒平坦性向上

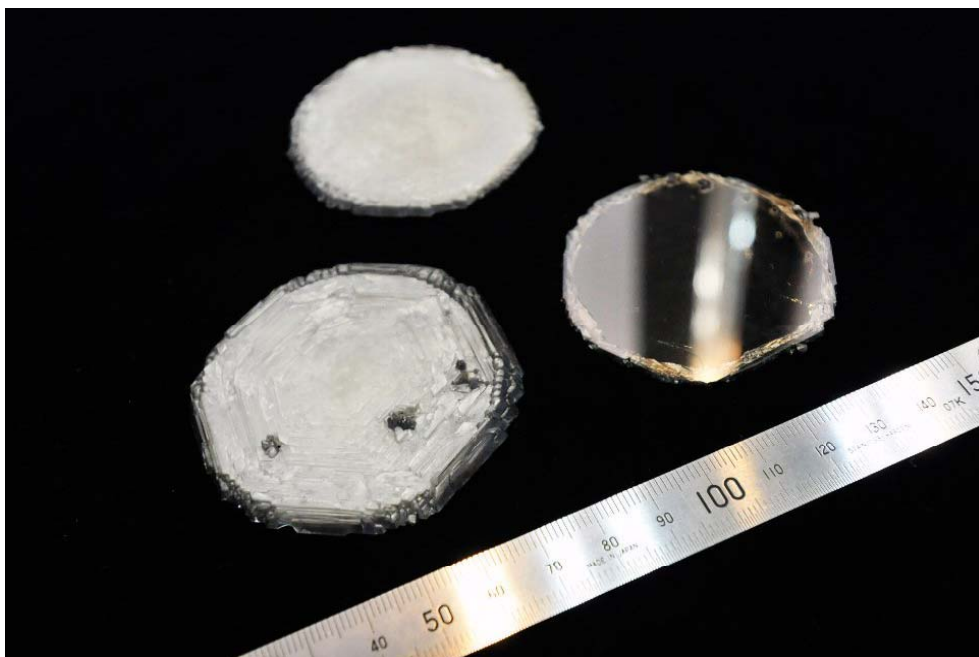
➡ 流れの均一化、流速増加による効果

9/89

## 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

## 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開



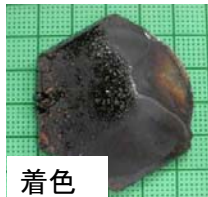
揺動法で育成した2インチ有極性GaN結晶

10/89

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(2インチ有極性GaN結晶の展示に至るまで)

公開

従来の問題点 → 歪低減が鍵 → 研磨時にクラック発生 → nano tech 2009へ



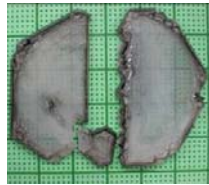
着色



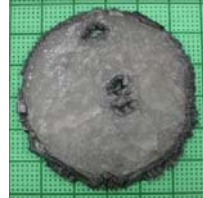
クラック



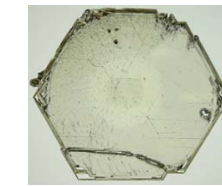
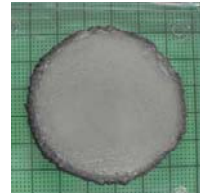
2分割シード結晶  
⇒歪低減  
⇒クラックフリー



低歪基板の開発により  
2インチでクラックフリー



さらなる低歪基板の開発



研磨時にクラック発生



nano tech 2009で展示

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

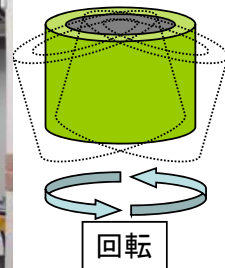
公開

大口径化技術の検討

特許出願済

②4軸揺動機構の導入(加速予算)

①大型育成炉導入、立上げ



圧力容器4角にそれぞれ独立に上下運動できる  
ロッドを配置し、それぞれのロッド高さを制御すること  
で圧力容器を自在に揺動させることが可能

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

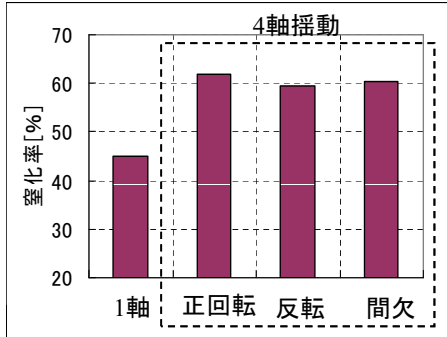
公開

研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

(4軸揺動による攪拌の高度化)

窒化率

揺動角度:10°  
周期:1rpm

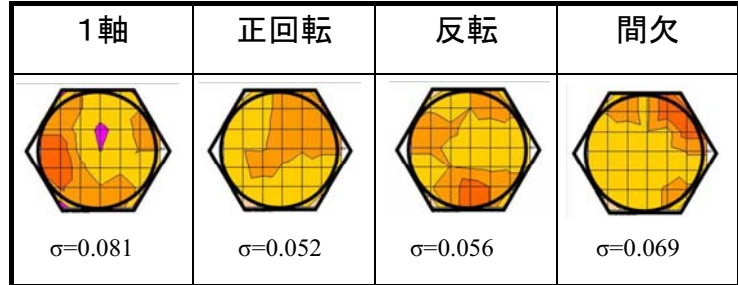


4軸揺動で窒化率増加

膜厚分布

揺動角度:10°  
周期:1rpm

育成した2"結晶の膜厚分布(0.1mm等高線)



4軸揺動で膜厚分布、平坦性良好

4軸揺動(正回転、反転、間欠)で攪拌効率向上

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

公開

研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

育成した4インチφ結晶(テンプレート上)

揺動条件:反転 10° 1rpm  
育成圧力:3.4MPa



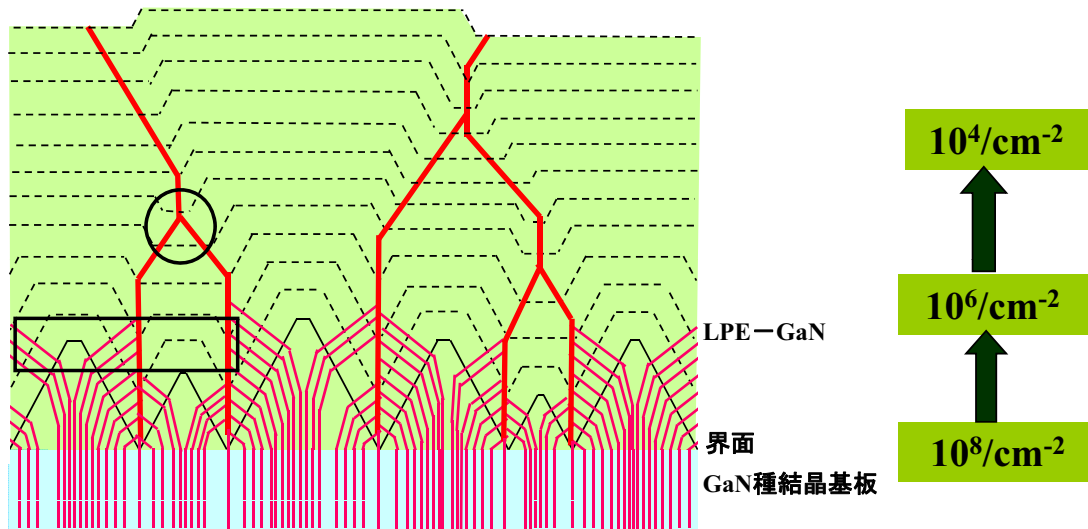
平均膜厚:1.3mm

4インチGaN結晶育成技術の開発

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開

転位減少機構の模式図



成長中の転位減少機構を解明⇒低転位化技術の開発

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開

(成長モード制御による低転位化技術)

Ga/Na比による成長モードの変化を観察

Ga/Na	18:82	30:70 (従来条件)	40:60
写真			
SEM			

低Ga組成・・・(0001)面が現れた2D成長モード

高Ga組成・・・(10-11)面が現れた3D成長モード

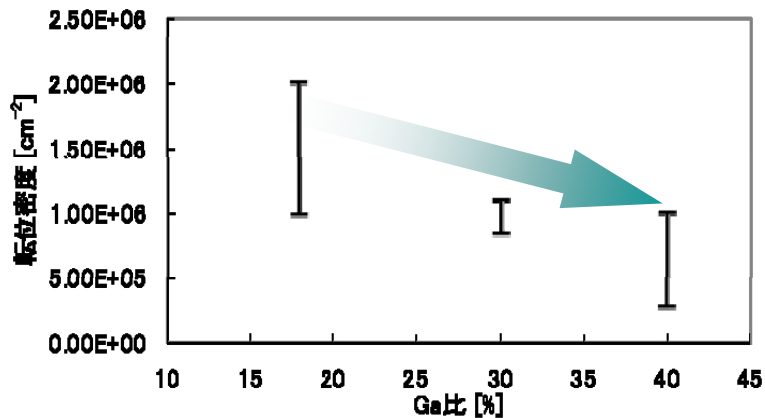


## 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

## 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

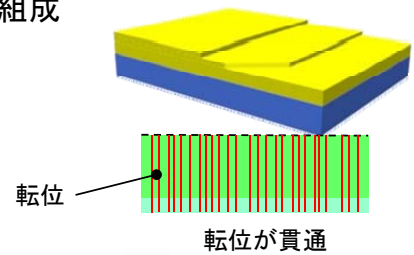
公開

## (成長モードと転位密度)

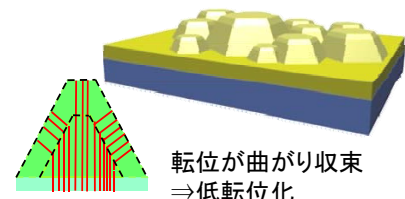


転位密度のGa組成条件依存性

低Ga組成



高Ga組成



## 3D成長モード(高Ga組成)

⇒(10-11)面による転位の曲がりと収束が促進

⇒低転位化に有利な成長モード

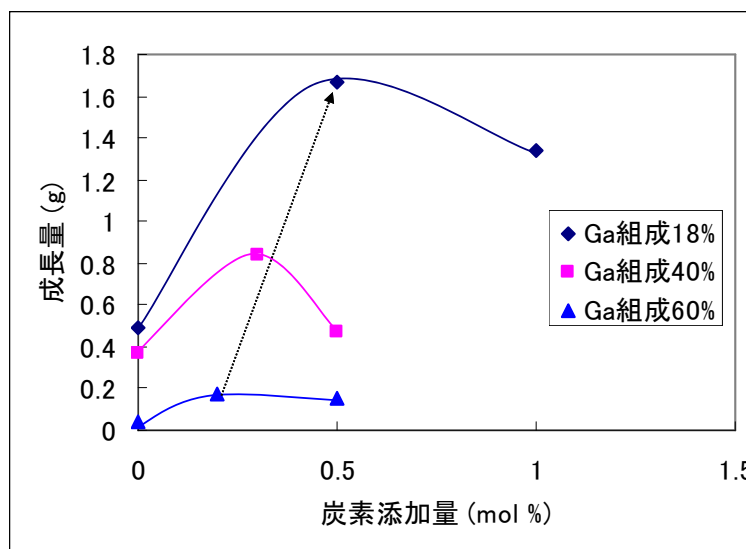
17/89

## 研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」

## 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開

## (成長量(速度)の原料組成・炭素添加量依存性(30気圧))



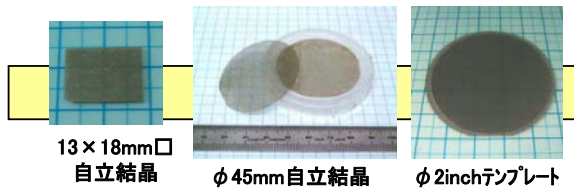
- ・高Ga組成(60%)では成長量低下
- ・炭素添加量に対し極大値存在
- ・極大値は高Ga組成ほど低炭素量方向にシフト

18/89

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(2)大口径種結晶の開発

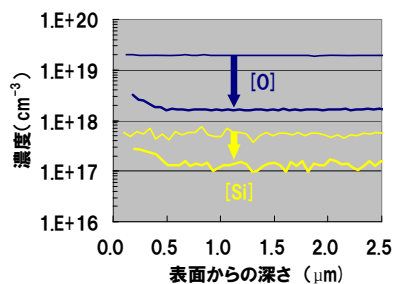
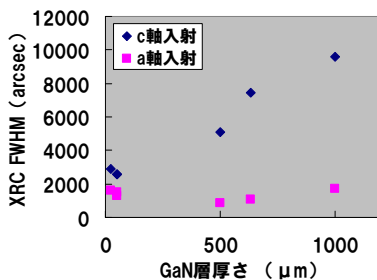
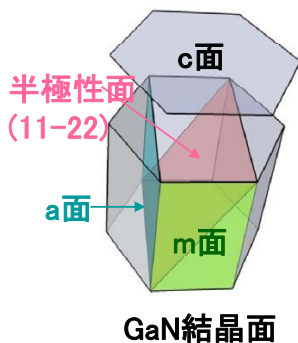
公開

m面



- ◎サファイヤ上m面GaNのHVPE成長に成功
- ◎10mm□以上の自立基板をNaフラックスLPE用基板結晶として52枚供給
- ◎φ45mm自立基板を作製

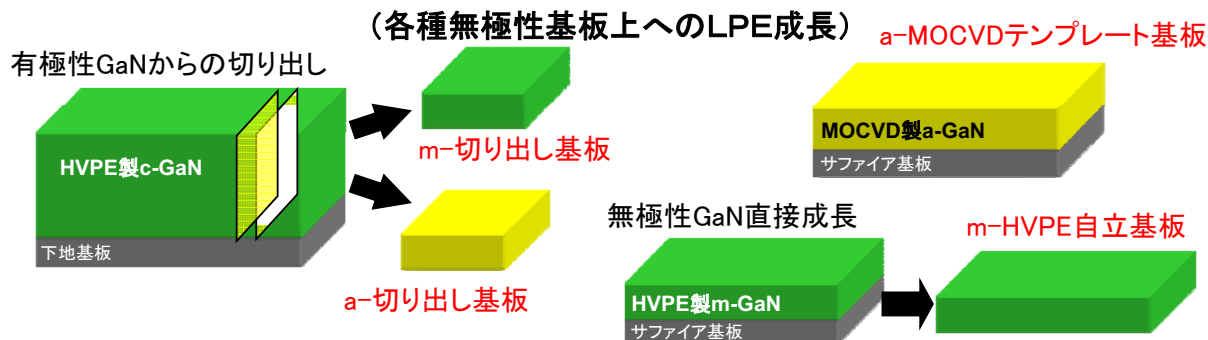
HVPE法によるm面GaN結晶



- ◎製造条件とm面結晶性の相関を検討
- ◎c面より高濃度の不純物混入
- ◎Si < 5 × 10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>、酸素 < 2 × 10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup> まで低減成功

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

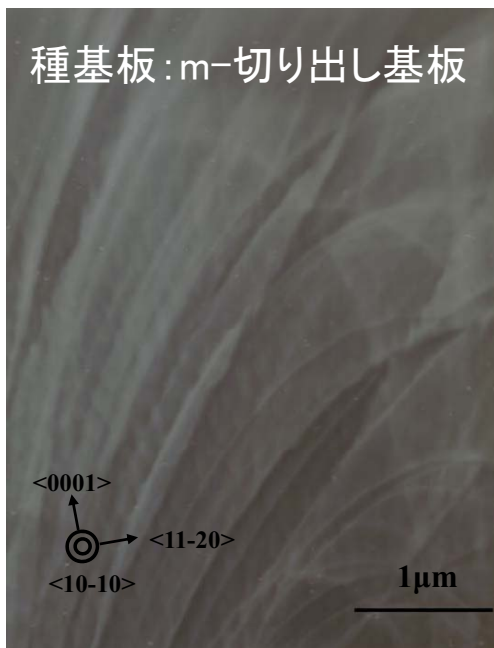
公開



	m-切り出し基板	a-切り出し基板	a-MOCVD基板 (ELO)	a-MOCVD基板 (SELO)	m-HVPE基板
Seed 基板					
Seed XRC	72 arcsec	未測定	652 arcsec	1358 arcsec	830 arcsec
as-grown 結晶写真					
LPE XRC	100 arcsec	46.8 arcsec	52.2 arcsec	102 arcsec	1300 arcsec

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開



(無極性GaNの平面TEM観測結果)

種基板:a-切り出し基板  
 m-切り出し基板  
 転位密度: $<10^6/cm^2$

種基板:m-HVPE基板  
 転位密度: $\sim 10^8/cm^2$



種基板の高品質化が重要

観察視野内では転位は観察されなかった

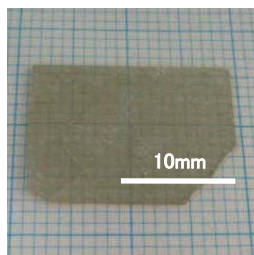
⇒ 転位密度  $<10^6/cm^2$ 

21/89

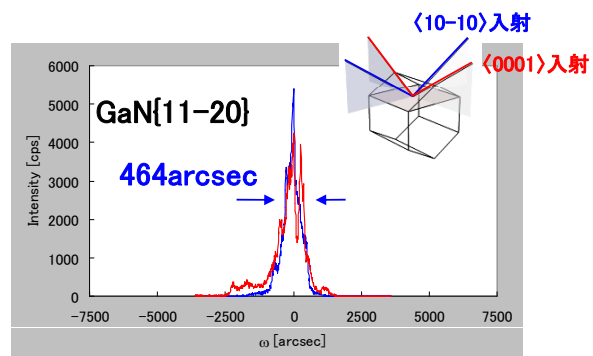
研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(2)大口径種結晶の開発

公開

a面



13×18mm  
 a面GaN自立結晶



a面GaN自立結晶のXRC

◎ HVPE厚膜成長により、10mm口以上のa面GaN自立結晶を試作

◎ m面GaNに比べて結晶性向上  
 (XRC半値幅 $\leq 500arcsec$ 、入射方向異方性解消)

22/89

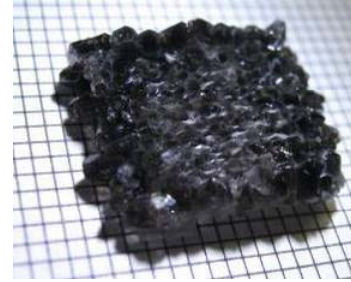
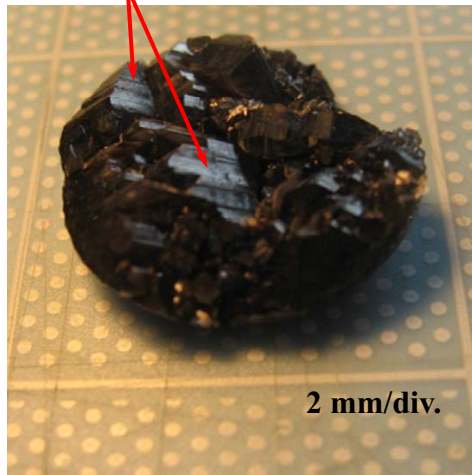
研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開

高品質化への方策:グレインサイズを大きく→種基板作製法を検討

種基板結晶⇒古河機械金属作製 a-GaN自立種基板

m面が広く現れた(切り出し基板を除き最大)



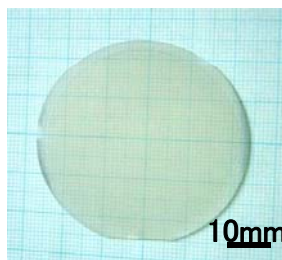
a-GaN種基板(テンプレート)上の  
LPE成長

23/89

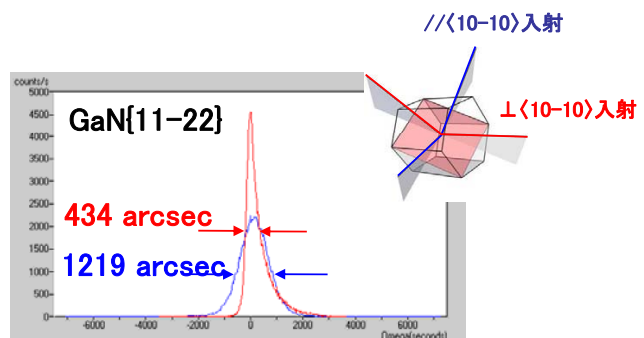
研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(2)大口径種結晶の開発

公開

{11-22}面 (半極性面)



{11-22} GaN φ2"テンプレート



{11-22} GaNのXRC

◎ m面サファイヤ上HVPE成長によりφ2inch{11-22}面GaNテンプレート  
 (厚さ約25μm)を試作

◎ バッファ層の工夫により、平滑・透明な表面と、良好な結晶性を実現

24/89

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(1)窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

公開

高品質化への方策:透明結晶化→種基板面方位を検討

種基板結晶 ⇒ 古河機械金属作製半極性(11-22)GaNテンプレート基板



グレインの会合が進行した透明なGaN結晶が育成された  
 ⇒ 成長様式は面方位にも依存

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
 研究開発成果について(2)大口径種結晶の開発

公開

単位: arcsec

青 : ⊥c軸入射  
 赤 : //c軸入射

	m {10-10}面	a {11-20}面	{11-22}面
自立結晶 (500μm厚) 13x18mm ~φ45mm 			
テンプレート (25μm厚) φ2" 			

HVPE法による非極性各種GaN結晶のXRCの比較

- ◎ a面GaN結晶が比較的高品質
- ◎ {11-22}半極性面GaNについても、ELOによる更なる品質改善効果を確認
- ◎ m面GaNに関しても、下地基板の工夫(傾斜カット、表面加工など)による品質改善を継続して行う

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(3)高導電性窒化物単結晶基板の開発

公開

n型不純物 (Si, Ge, Sn, O)の検討

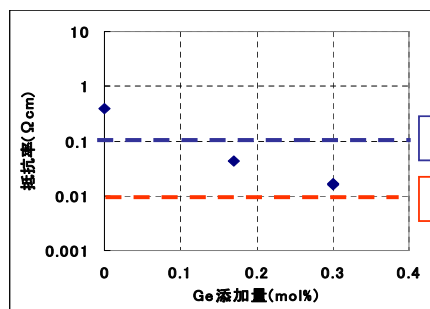
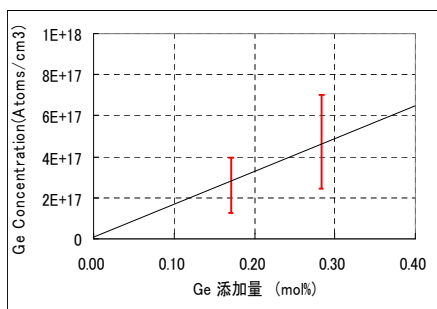
添加物 mol%	無添加	Si 0.03	Si 0.07	Ge 0.05	Ge 0.08	Sn 0.01	Sn 0.04	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.02	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0.03
育成結果									
窒化率	83%	0%	0%	76%	86%	79%	85%	61%	0%
蛍光 OM像		/							/
PL (RT)	/								

Geをn型不純物として選定

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(3)高導電性窒化物単結晶基板の開発

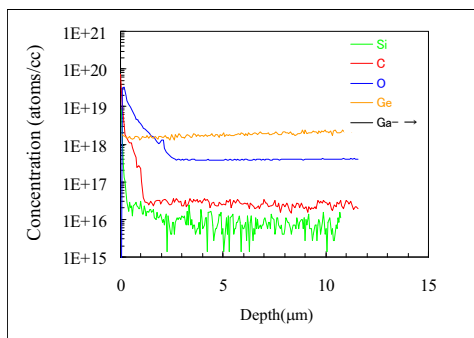
公開

Ge添加GaN結晶育成の検討



特許出願済

Ge添加量とともに、Geの結晶中への取込量が增大  
0.17mol%添加で抵抗率:0.04Ω cm

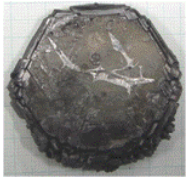
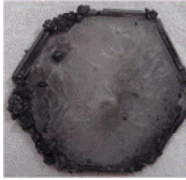



さらに育成条件を最適化し、結晶中への  
Ge取込量 2x10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>を実現

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(3)高導電性窒化物単結晶基板の開発

公開

## 2インチ結晶育成(Ge添加)

	揺動:1軸 Ge 0.15mol%	揺動:反転 Ge:0.15mol%	揺動:反転 Ge:0.15mol% (原料組成変更)
結晶写真 (育成後)			
窒化率	51% (38g)	74%(55g)	40%(18.3g)
LPE率	37%(28g)	34%(25g)	39%(17.7g)
平均膜厚	2.2mm	2.0mm	1.6mm

自立基板上のGe添加2インチ結晶育成が可能となった

29/89

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(4)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

公開

## 各種不純物検討結果

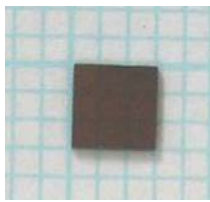
	Fe	Mg	Zn	Mn	SUS310S	ハンドーフ <sup>o</sup>
ドーパ <sup>o</sup> 量	$1 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{19}$	$2 \times 10^{19}$	$5 \times 10^{17}$ 、 $3 \times 10^{18}$	Mn $5 \times 10^{17}$ Fe $6 \times 10^{16}$ Cr $3 \times 10^{15}$	-
比抵抗	5.5	100	$10^6 \sim 10^8$	1000、 10200	288	0.2
残留 キャリア	$6 \times 10^{15}$	$7 \times 10^{16}$	測定不可	測定不可	測定不可	$4 \times 10^{16}$
極性	n型	不明	不明	不明	不明	n型

Zn添加により、世界で初めてNaフラックス法による高抵抗化を実現

30/89

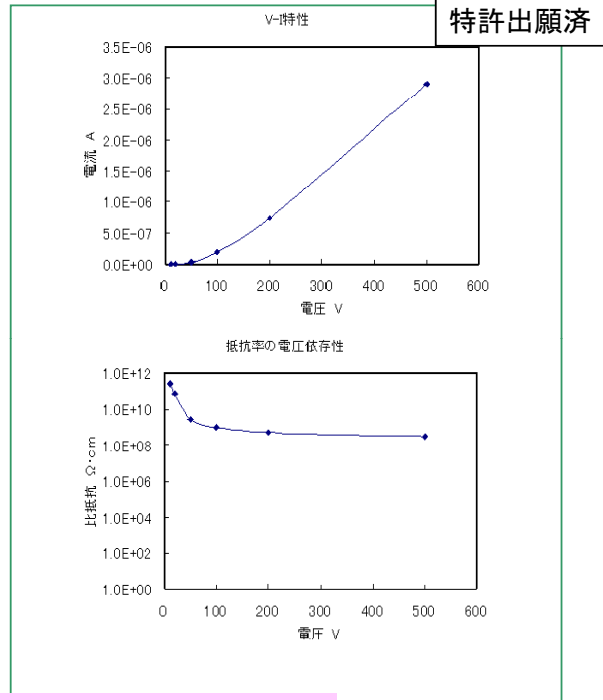
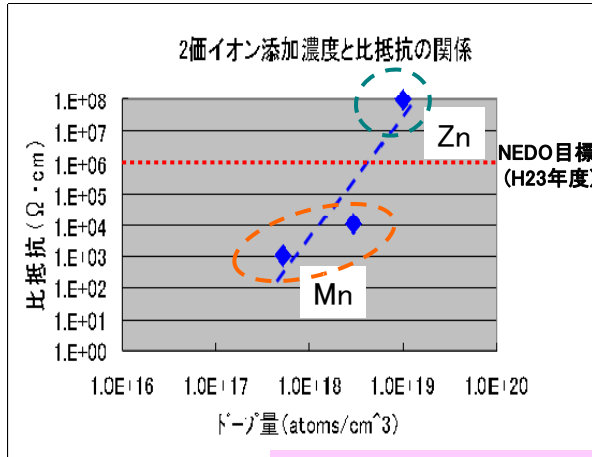
研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(4)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

公開



比抵抗測定結果

Zn濃度  
表:  $1 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>3</sup>  
裏:  $2 \times 10^{19}$  atoms/cm<sup>3</sup>  
サンプルサイズ:  $3 \times 3 \times 0.5$ t



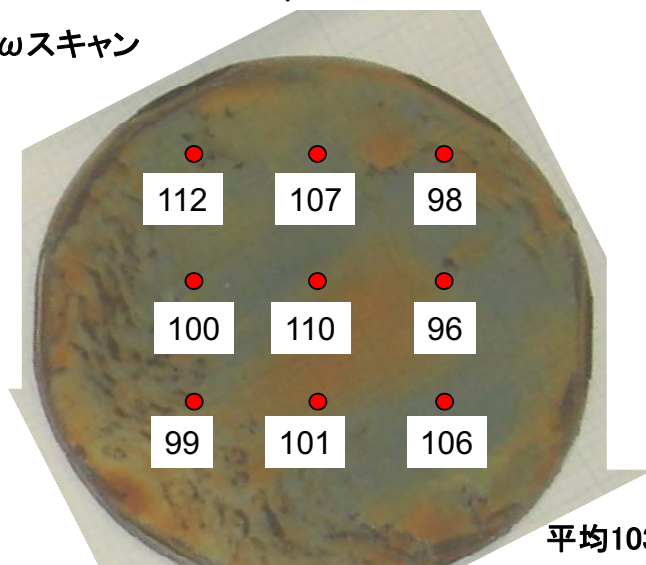
Znを $10^{18} \sim 10^{19}$  atoms/cm<sup>3</sup>添加することにより  
目標値以上の抵抗値 ( $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ) を達成

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(4)高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

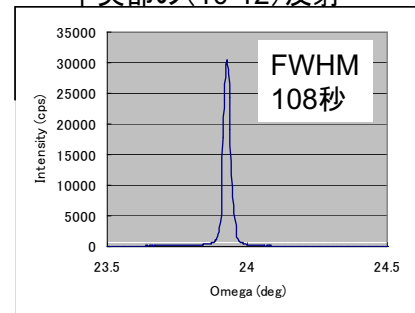
公開

Zn添加したφ2”サンプルのXRC半値幅分布

(0002) ωスキャン



中央部の(10-12)反射



基板の反り:凹  
曲率半径=4.2m  
(種基板: 1.3mより大幅改善)

平均103秒  
 $\sigma = 5.7$

・Zn導入量が異なる領域(着色の程度で判断)でも、XRC半値幅に違いは無い  
・Zn添加による、結晶性の劣化は見られなかった



研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(知財と標準化 及び成果の普及)

公開

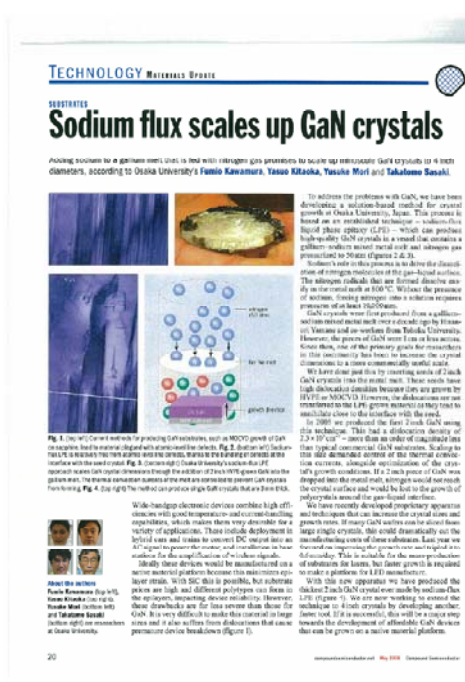
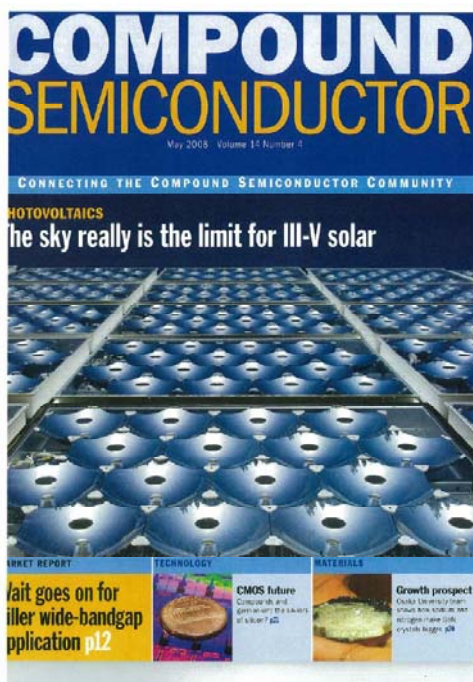
知的財産権、成果の普及

	H19	H20	H21	計
特許出願(出願予定)	0	4	4(1)	8(1)件
論文(査読付き)	0	5(5)	0	5(5)件
研究発表・講演	9	9	4	22件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	1件
展示会への出展	0	1	0	1件

※ : 平成21年8月28日現在

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(知財と標準化 及び成果の普及)

公開



研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
研究開発成果について(今後の課題)

公開

最終目標である伝導性制御された高品質大型GaN結晶を実現するためには下記の研究開発を継続的に実施することが重要である

- (1) 溶液状態・核発生・成長方位・転位制御技術の高度化
- (2) 高品質無極性種基板結晶の開発
- (3) Ge、及びZnの高濃度・均一添加技術
- (4) GaN結晶長尺化技術の開発

研究開発項目①「高品質大口径単結晶基板の開発」  
実用化の見通しについて(波及効果)

公開

企業名	実用化の対象	平成22年 (2010年)	平成23年 (2011年)	平成24年 (2012年)	平成25年 (2013年)	平成26年 (2014年)	平成27年 (2015年)
豊田合成	高導電性無極性GaN基板			高品質化、サンプル展開	実用化	製品化	
日本ガイシ	高抵抗化GaN単結晶基板			高品質化、量産設備導入	実用化	製品化	
古河機械金属	種結晶基板			プロセス簡素化、量産技術検討 商品開発、品質改善、量産技術検討	実用化		製品化

NEDOプロジェクト

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発  
—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長  
技術の開発」(中間評価)

(2007年度～2011年度 5年間)  
プロジェクトの詳細(公開)

研究開発項目②  
「高品質大口徑エピタキシャル成長技術の開発」

2009年 8月31日

サブリーダー

名城大学 教授 天野 浩

37/89

(1)大口徑基板上的高品質エピタキシャル成長技術の開発

- ・窒化物基板上的高均一・高品質結晶成長技術
- ・デジタルMOVPEの開発

(2)高In組成窒化物層成長技術の開発

- ・高In組成GaInNエピタキシャル層の成長技術の開発

(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

- ・高Al組成AlGaInNエピタキシャル層の成長技術の開発
- ・無極性面AlN基板の開発および有極性面・無極性面AlN基板の有用性確認

(4)結晶成長その場観察評価技術の開発

- ・2次元形状測定技術の開発

38/89

3. 研究開発成果について

公開

(1)中間目標の達成度(中間目標と達成状況)

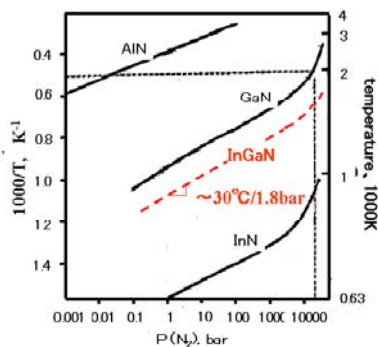
研究開発項目	中間目標	成果	達成度
②高品質大口径エ ピタキシャル成長 の開発の開発	2インチ有極性、及び無極性窒化物基板上への エピタキシャル成長	世界初、AlGa <sub>N</sub> のALEに成功 AlGa <sub>N</sub> の低温成長に成功	◎
	Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> N(0.2<x<0.5)エピ成長・ドーピング不純物 濃度 N型>10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> P型>10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup> Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N混晶(0.2<x<0.5)エピ成長・ドーピング 不純物濃度 N型>10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> P型>10 <sup>17</sup> cm <sup>-3</sup>	加圧効果確認 無極性面成長について加圧炉調整中  N型~9×10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup> P型~2×10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>	○
	GaNホモエピ成長層 残留ドナー濃度<5×10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup> 転位密度: 有極性<10 <sup>5</sup> cm <sup>-2</sup> 、無極性<10 <sup>6</sup> cm <sup>-2</sup> 面内均一度: 厚み±5%、ドーピング不純物濃度±10% ドーピング精度±20%	残留ドナー濃度<10 <sup>14</sup> cm <sup>-3</sup>  X線トポグラフで確認中  厚み精度<±5%、 ドーピング精度<±1%	○

◎:当初計画以上の成果 ○:今年度達成・達成見込み △:来年度以降

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(研究開発の意味と装置開発の経緯)

公開

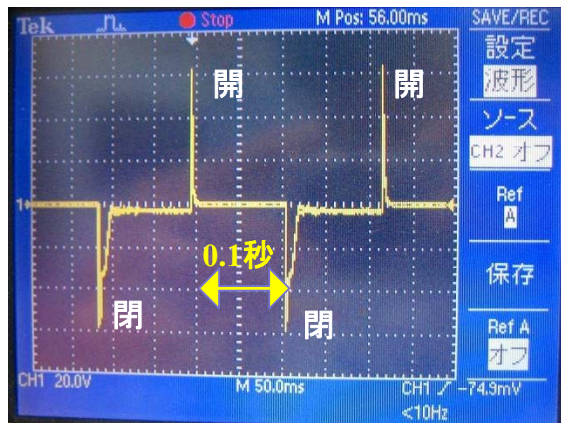
なぜ加圧か?



より高温でのInGaN成長が可能になる

なぜ高速パルススイッチングか?

- 原子レベルで平坦なAlGa<sub>N</sub>/GaIn<sub>N</sub>成長のための  
原子層レベル膜厚制御性
- 高濃度原子層ドーピングによるチャンネル形成



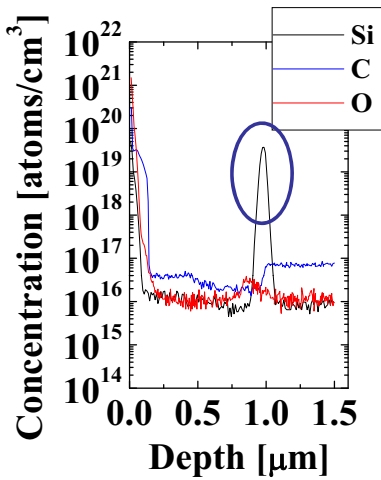
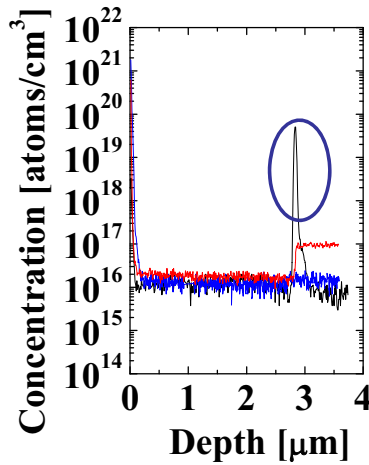
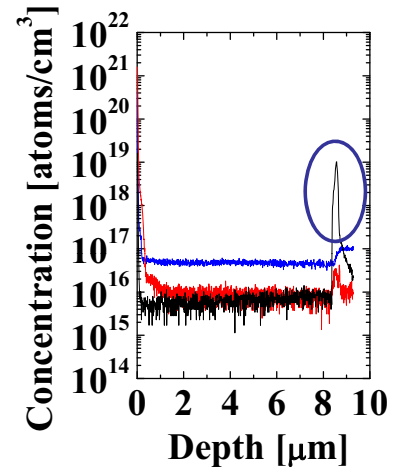
パルス開閉動作信号  
(聴覚により確認)

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」

研究開発成果について(1)大口径基板上的高品質エピタキシャル成長技術の開発

公開

- 残留不純物のプロファイル (FeドープGaN基板上)

u-GaN 1 $\mu$ mu-GaN 3 $\mu$ mu-GaN 9 $\mu$ m

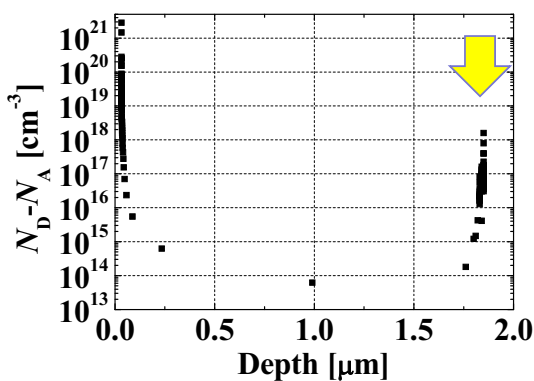
Epi/Sub界面でのバッファリークの起源の解明

41/89

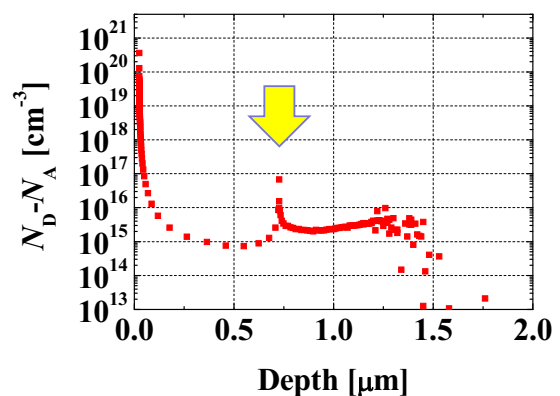
研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」

研究開発成果について(1)大口径基板上的高品質エピタキシャル成長技術の開発

公開



プロセス改善前のHFETのC-V



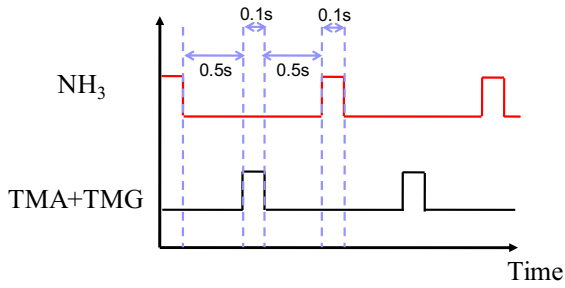
プロセス改善中のHFETのC-V

Epi/Sub界面でのバッファリークの起源の解明

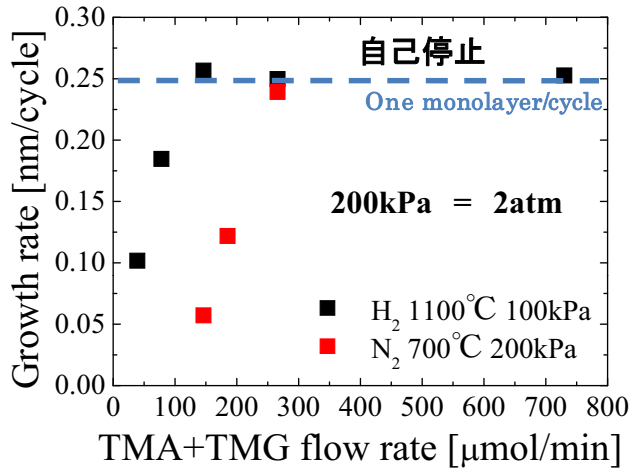
42/89

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
 研究開発成果について(1)大口径基板上の高品質エピタキシャル成長技術の開発

公開



TMA 7.6 $\mu$ mol/min  
 TMG 55.8 $\mu$ mol/min  
 VIII ratio 2744

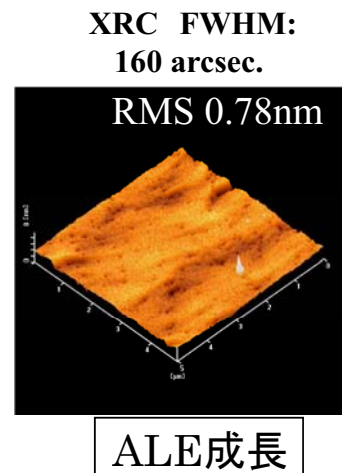
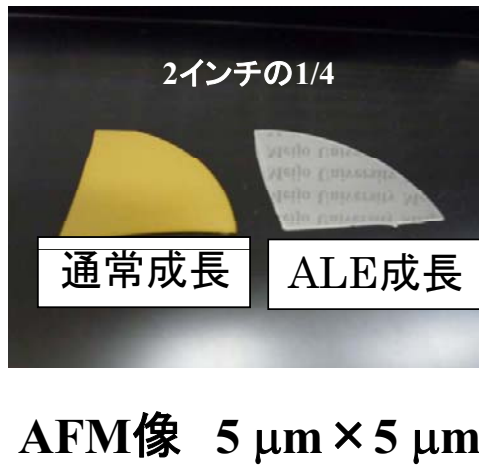
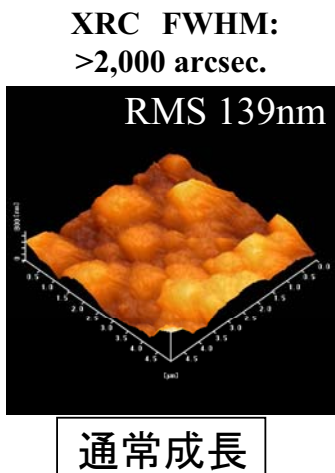


**窒化物半導体で初めて自己停止機能を確認！  
 → 1原子層ずつの成長制御が可能！**

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
 研究開発成果について(1)大口径基板上の高品質エピタキシャル成長技術の開発

公開

デジタルMOVPEの開発

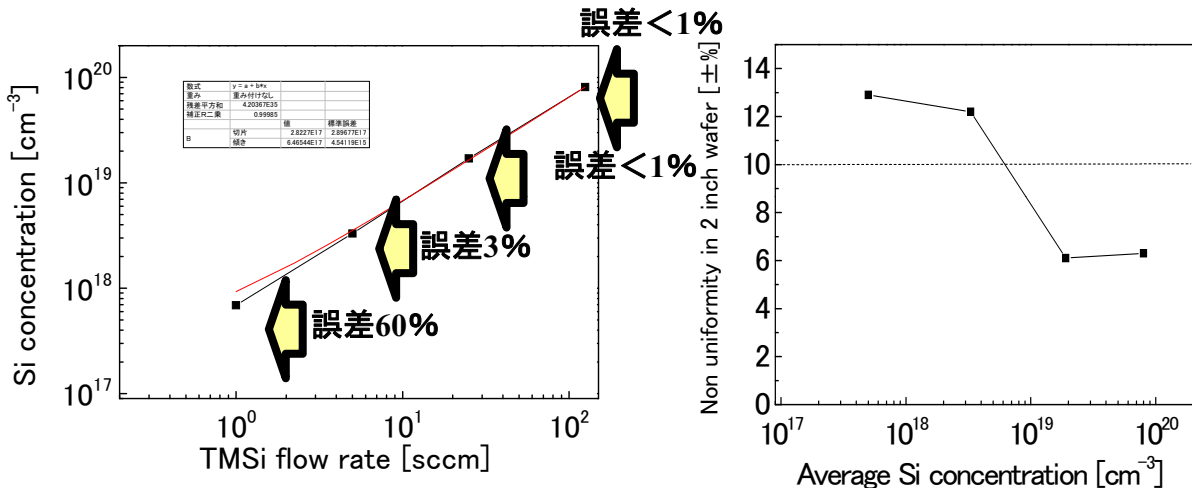


**世界初、加圧化でAlGaInの原子層エピタキシャル成長に成功！  
 →GalnNチャネル、AlGaInバリア層作製法確立！**

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
 研究開発成果について(1)大口径基板上的高品質エピタキシャル成長技術の開発

公開

2インチc面GaN基板上の  
 Siドーピングの制御性と均一性・・・誤差1%以内を実証！



研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
 研究開発成果について(2)高In組成窒化物層成長技術の開発

公開

(2)高In組成窒化物層成長技術

(a)高圧MOCVD成長用有機In原料の選択

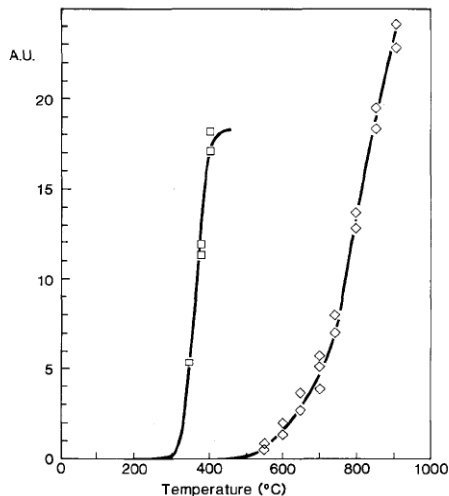
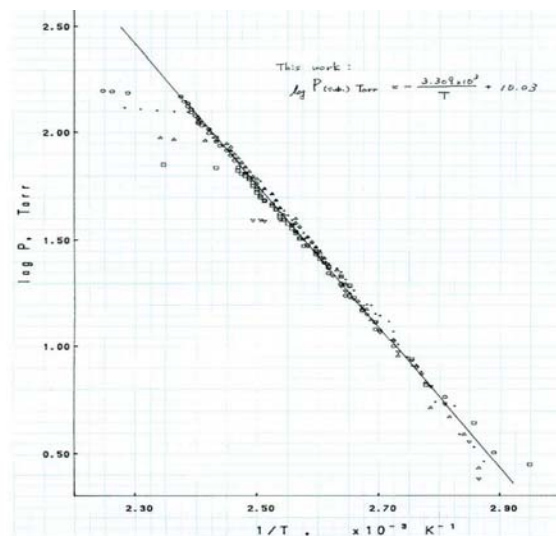


Figure 1. Thermal decomposition of  $(CH_3)_2In$  ( $\diamond$ ) and  $(CH_3)_3In$  ( $\square$ ) in  $H_2$  atmosphere. The amount of In metal deposited per unit time, normalized for the area of the substrate, is expressed as a rate in arbitrary units.

シクロペンタジエニルInの分解温度



シクロペンタジエニルInの蒸気圧

(出典: J. Am. Chem. Soc., 111(1989), p. p. 7648~7650.)

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(2)高In組成窒化物層成長技術の開発

公開

(2) 高 In組成窒化物層成長技術

(b) 口径2インチの有極性又は無極性GaN基板上への加圧GaInN成長  
(i) 有極性(c面:(0001)面)上のGaN膜の加圧MOVPE成長



図3 試料構造

【成長条件】

- 圧力: 200kPa
- 成長温度: T/C 1180
- 成長時間: 30min
- TMG: 2.86E-5mol/min
- NH3: 0.174mol/min
- V/Ⅲ: 609

表1 加圧成長GaNの結晶性 単位: arcsec

	(0002)	(20 $\bar{2}$ 4)
加圧成長GaN	333	580
GaNテンプレート	385	780

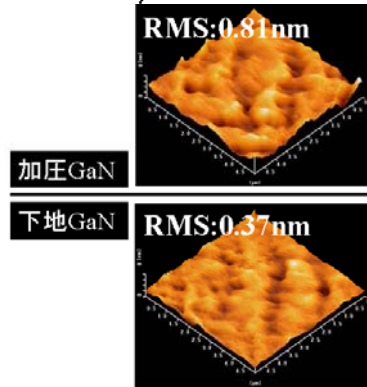


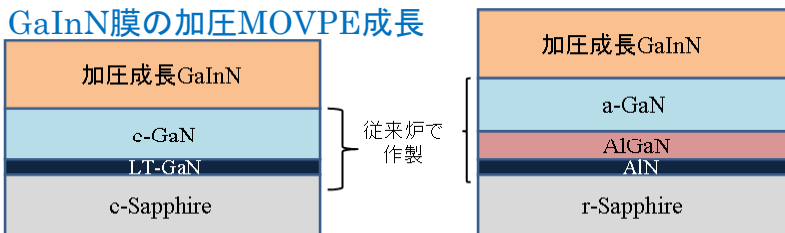
図4 加圧GaN層とテンプレート下地GaN層のAFM像

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(2)高In組成窒化物層成長技術の開発

公開

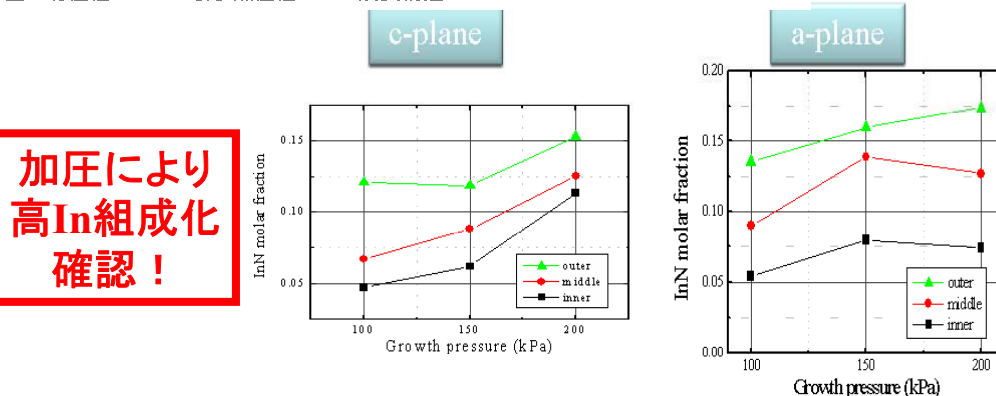
(2) 高 In組成窒化物層成長技術

(ii) 有極性(c面:(0001)面)及び無極性(a面:11-20面)GaN層上へのGaInN膜の加圧MOVPE成長



- 成長温度: 750°C
- 成長圧力: 100, 150, 200kPa
- In/(In+Ga)=0.5
- V/Ⅲ比: 5686
- 成長時間: 1h
- ※流速が一定になるようにガス総流量を調整した。

図5 有極性InGaInおよび無極性InGaIn成長構造



加圧により  
高In組成化  
確認!

図7 有極性InGaInおよび無極性InGaInのInNモル分率の成長圧力依存性

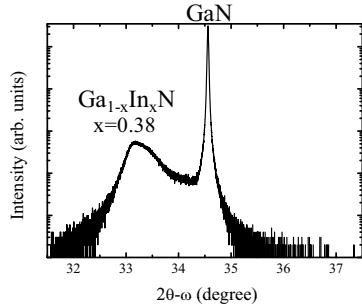
※ただし、InNモル分率算出に歪みは考慮していない。



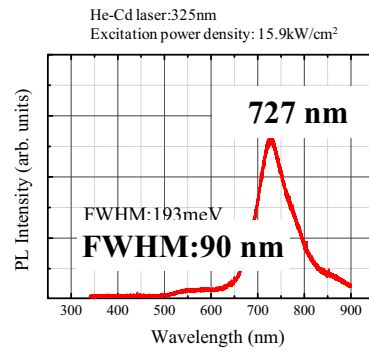
研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(2)高In組成窒化物層成長技術の開発

公開

(2) 高 In組成窒化物層成長技術

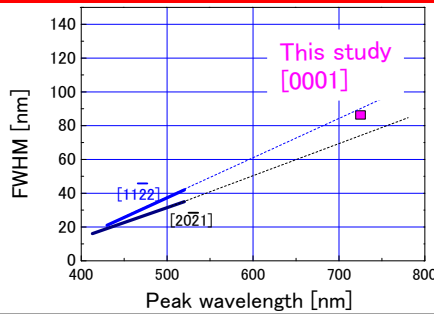


XRD 2θ-ω scan of c-plane GaInN film grown at 200 kPa



PL Spectrum of c-plane GaInN film grown at 200 kPa

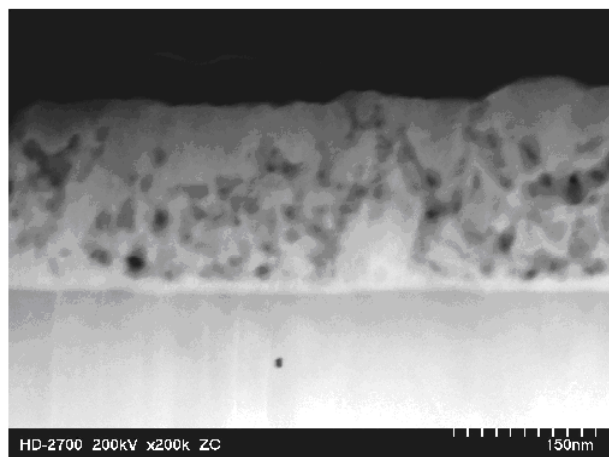
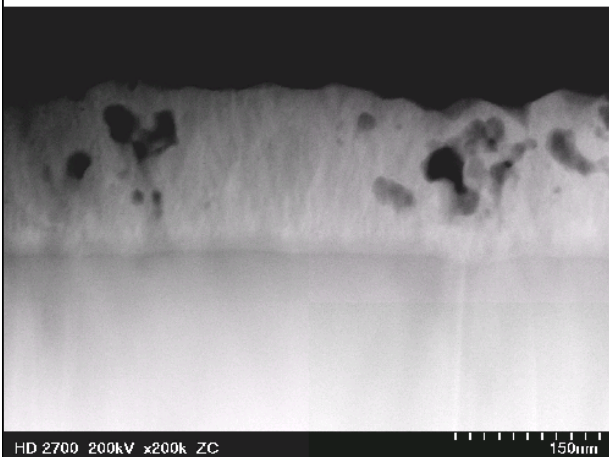
**世界初、加圧MOVPE法による厚膜高In組成GaInNの成長に成功！**



研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(2)高In組成窒化物層成長技術の開発

公開

(2) 高 In組成窒化物層成長技術



無極性面上の高In組成GaInNの断面TEM像

黒いところは空洞, In組成揺らぎは±13%

(施策)

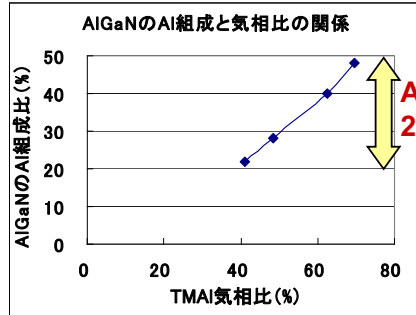
- ① 基板均熱加熱平面積拡大:ヒーター大口径化(2インチ用→4インチ用)
- ② 成長温度低温化  
高品質AlGaIn電子供給層の低温でのデジタルMOVPE成長が可能となったため、低温成長を実施する。併せて、空洞の発生の抑制を狙う。
- ③ 原料供給比率(V/Ⅲ比率)増大

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

**AlGa<sub>N</sub>エピ成長基礎検討-組成制御**

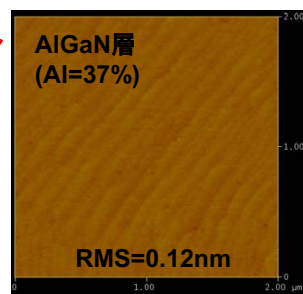
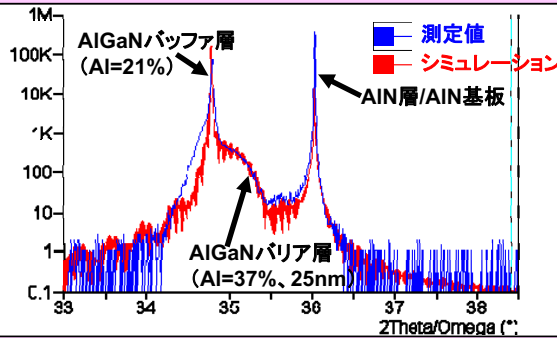
名城大・既存MOVPE炉を用いたAlGa<sub>N</sub>エピ成長基礎検討



AlGa<sub>N</sub>のAl組成  
20%~50%の範囲

TMAI気相比の制御で、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nの0.2 ≤ x ≤ 0.5の良好な組成制御が可能

AlGa <sub>N</sub> バリア層 Al=37%、25nm
AlGa <sub>N</sub> バッファ層 Al=21%、700nm
AlN層 AlN=800nm
低転位AlN基板



この条件を用いることにより、良好な構造制御と優れた表面平坦性が実現

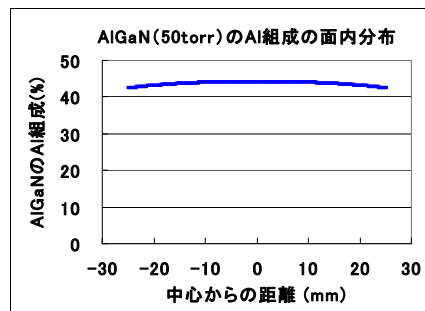
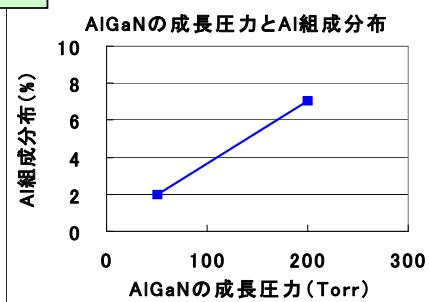
研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

**AlGa<sub>N</sub>のAl組成・膜厚均一性の改善**

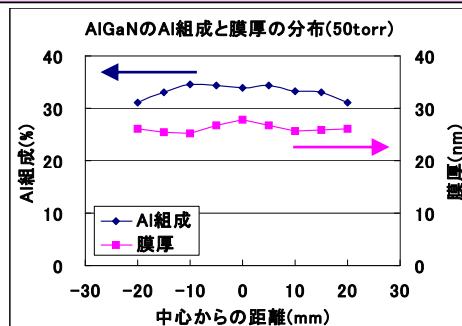
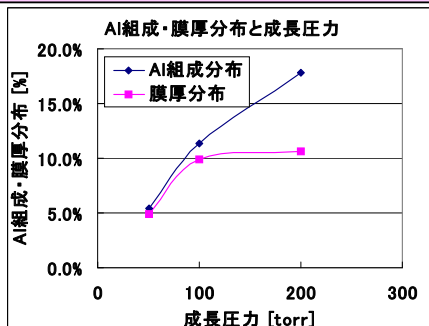
【シミュレーション】

実験への  
フィードバック



成長圧力を下げることで、Al組成・膜厚の分布を大幅に改善できるとのシミュレーション結果

【実験】

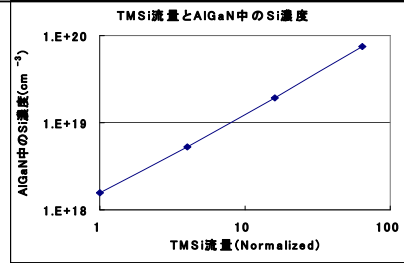
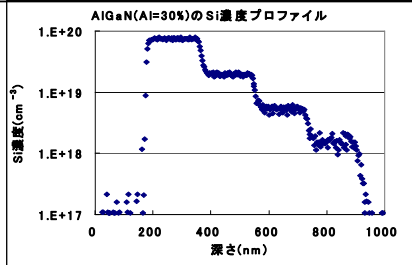


成長圧力を下げることにより、Al組成・膜厚の分布を大幅に改善(エピ成長実験)  
成長圧力50Torrで、膜厚分布±4.9%、Al組成分布±5.4%(目標の±5%以下をほぼ達成)

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

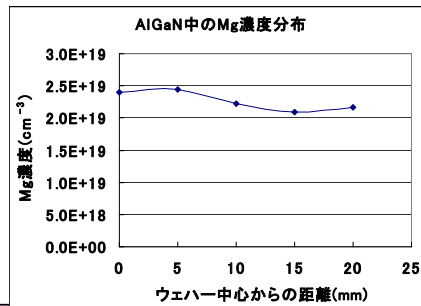
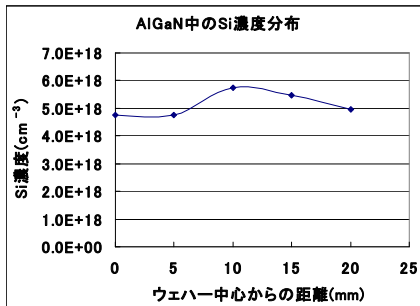
公開

AlGaInへのドーピング(n型不純物:Si、p型不純物:Mg)



メモリ効果等見られない良好なSiドーピング特性。

- ・Si:  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  ~  $9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  までの良好なドーピング制御 (目標のn型不純物 $>1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ を達成)
- ・Mg:  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  ~  $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  までの良好なドーピング確認 (目標のp型不純物 $>1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ を達成)



膜厚・均一性改善の知見を生かし、50torrにてSi,Mgドーピングを実施

- ・Siドーブ:  $4.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  ~  $5.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 $\pm 9.6\%$ (目標の $\pm 10\%$ 以下を達成)
- ・Mgドーブ:  $2.1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  ~  $2.4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、 $\pm 7.7\%$ (目標の $\pm 10\%$ 以下を達成)

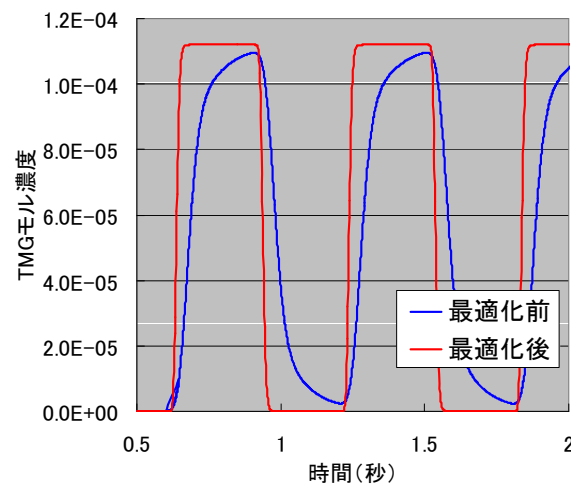
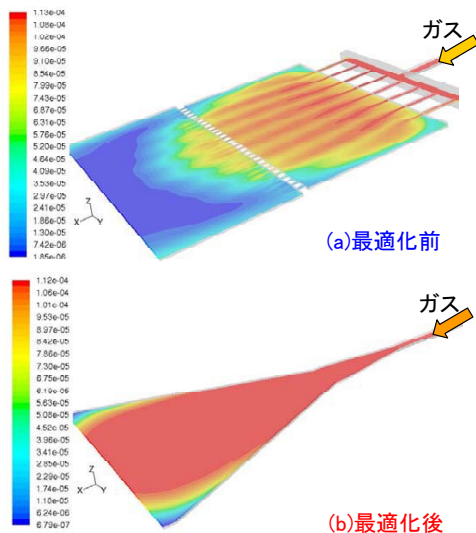
研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

高温CVD装置の高速バルブスイッチング対応ガス導入機構設計

基板大口径化に対応し、かつ、高速バルブスイッチングの原料ガス分離特性が良好なガス導入機構を設計

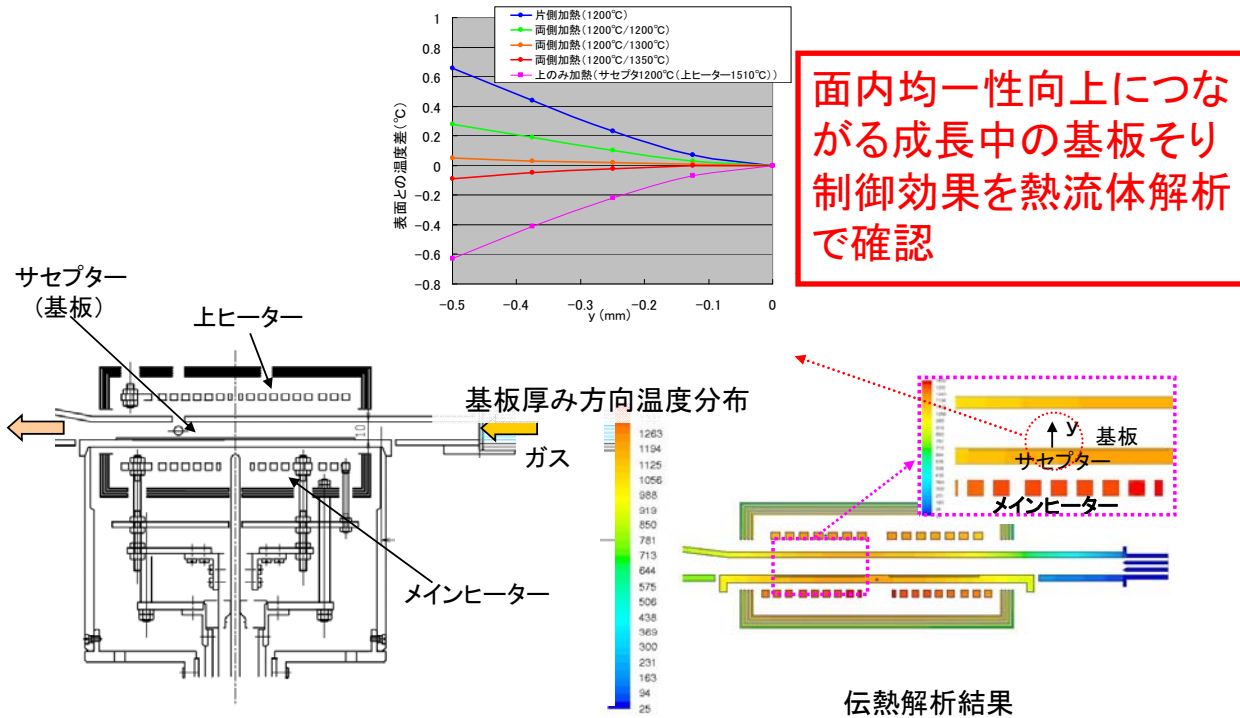
特許出願済



研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

高温CVD装置の両面加熱ヒーターの効果予測

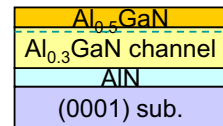


研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

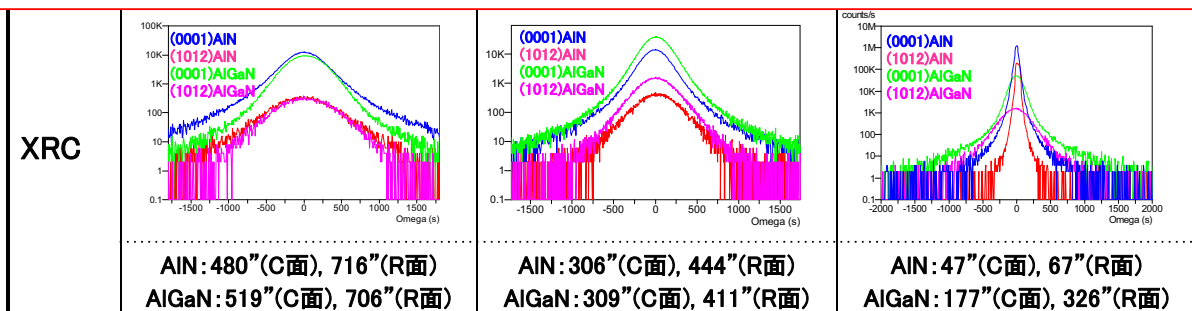
AlGaInエピ成長-AlGaInチャネルHEMT構造

高Al組成AlGaInエピ成長基礎条件確立  
→Al<sub>0.3</sub>GaNチャネル-HEMT構造を試作



	サファイア基板上	SiC基板上	AlN基板上
AFM	RMS=0.34nm	RMS=0.21nm	RMS=0.14nm

AlN基板適用によるAlGaInエピ層の結晶性向上を確認



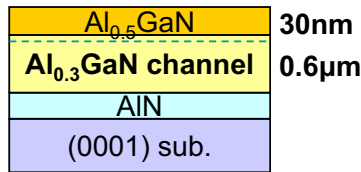
研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

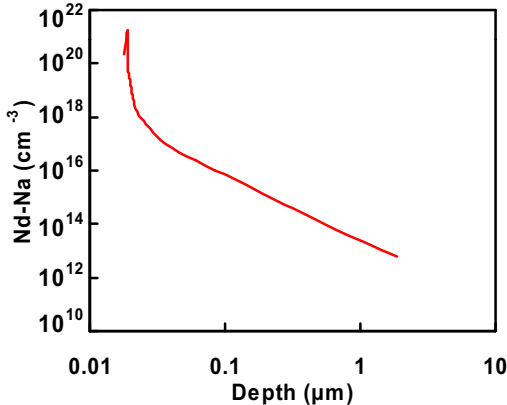
AlGaInチャンネルHEMTエビ特性

特許出願済

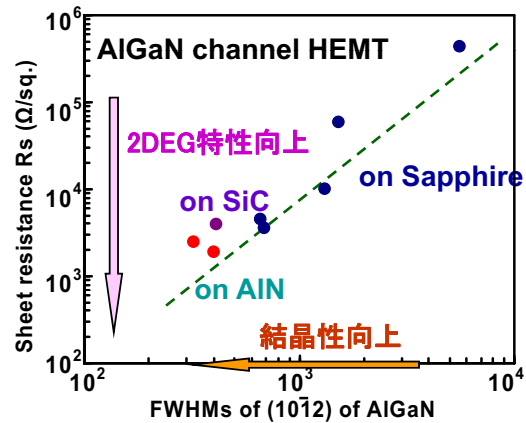
Al<sub>0.3</sub>GaNチャンネルHEMTエビ評価



AlGaInチャンネルHEMTのC-Vプロファイル



AlGaInチャンネル層の結晶性とシート抵抗



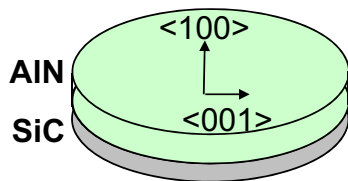
AlGaInチャンネル層結晶性向上→2DEG特性向上  
AlN基板適用によるAlGaInチャンネルHEMT特性向上に期待⇒デバイスGで評価

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

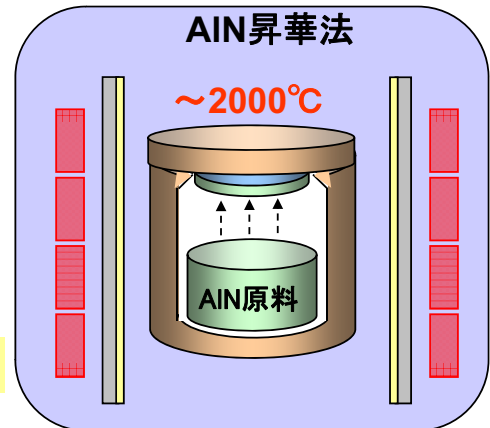
公開

無極性面AlN基板の開発内容

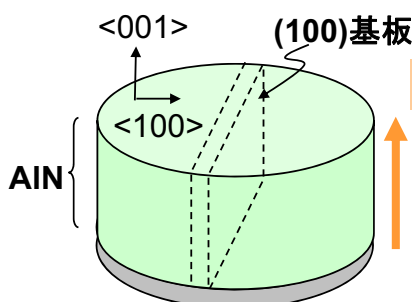
方策1: 無極性面のヘテロ成長技術



無極性面ヘテロ界面の欠陥制御技術の開発



方策2: C面長尺化による無極性面の切り出し



均一長尺成長技術の開発

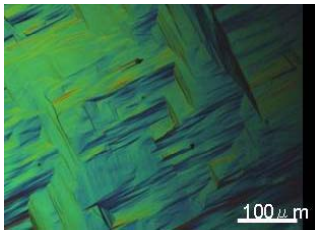
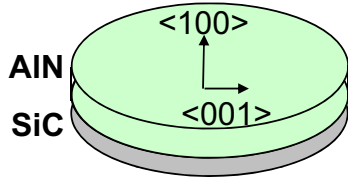
長時間成長  
温度分布制御  
雰囲気安定化

➔

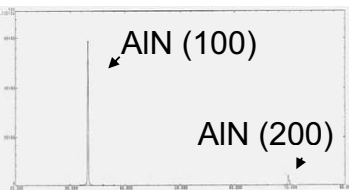
加熱方式開発  
炉内温度制御  
部材・構造検討

成長方法の基礎検討

方策1: 無極性面のヘテロ成長技術

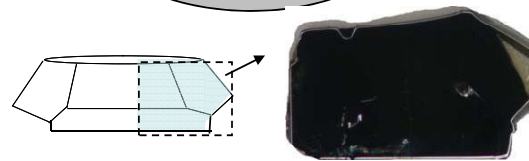
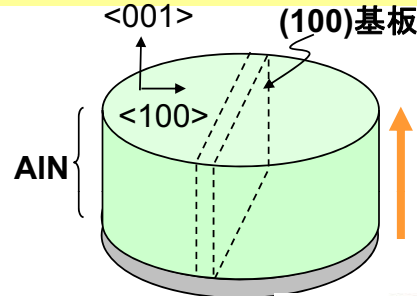


成長表面の顕微鏡像



X線回折(θ-2θ)による  
評価結果

方策2: C面長尺化



約4×6mm

M面AlNの外観

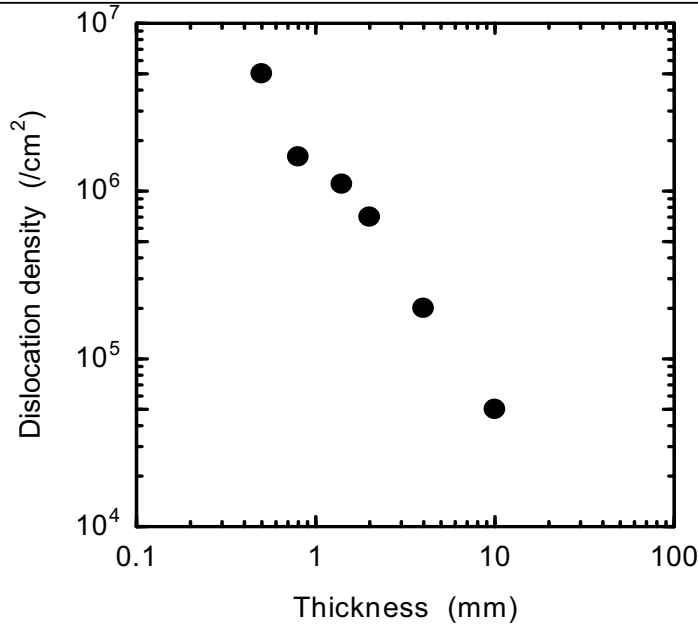
無極性面AlN基板の成長方法比較

評価	手法	方策1: 無極性面へのヘテロ成長技術	方策2: C面長尺化による無極性面
欠陥伝播 挙動 (TEM)		<p>成長表面(平面) 転位密度 <math>3 \sim 4 \times 10^8 / \text{cm}^2</math></p>	<p>成長表面(平面) 転位密度 <math>2 \sim 4 \times 10^6 / \text{cm}^2</math></p> <p style="border: 1px solid red; padding: 2px;">有利</p>
表面 クラック		<p>クラック間隔 大</p> <p style="border: 1px solid red; padding: 2px;">有利</p>	<p>クラック間隔 小</p>

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

### 転位密度低減への取組

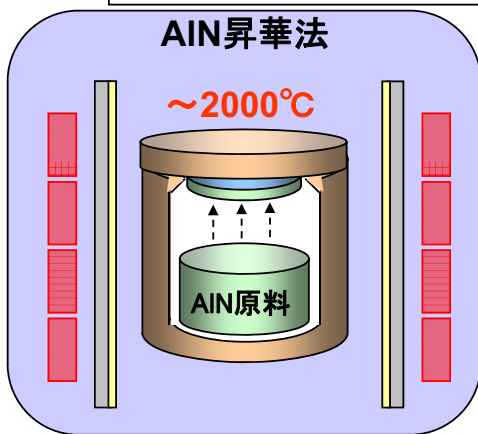


成長結晶の長尺化に伴う転位密度の減少を確認

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(3)高Al組成窒化物層成長技術の開発

公開

### 無極性面AlN基板開発装置



均一長尺成長技術の開発

特許出願済

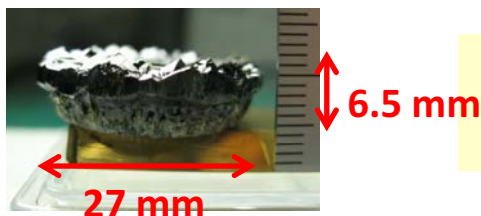
長時間成長  
温度分布制御  
雰囲気安定化

加熱方式開発  
炉内温度制御  
部材・構造検討

ヘテロ単結晶成長技術の開発

新構造の昇華炉を設計・導入。  
09年2月稼動開始。

既存炉で検証実験

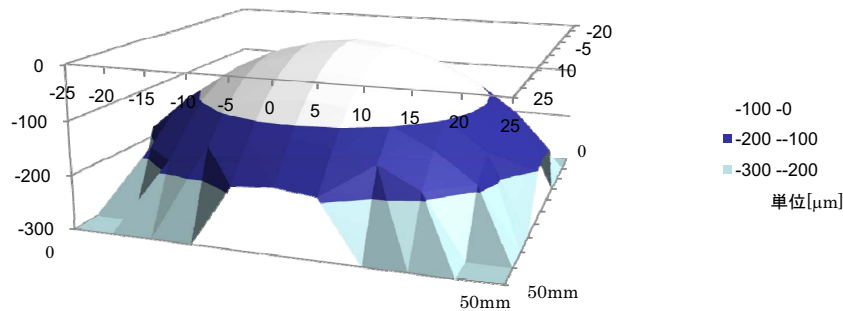


研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(4)結晶成長その場観察評価技術の開発

公開

・2次元形状測定技術の開発

新原理に基づく新しいウェハ形状測定法を開発



2インチc面サファイア基板GaNの  
ウェハ形状その場観察結果

測定精度:曲率10km以上!

異方性歪ウェハのヘテロ成長中のそり測定法を世界で初めて確立!

63/89

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
研究開発成果について(知財と標準化および成果の普及)

公開

知的財産権、成果の普及

	H19	H20	H21	計
特許出願(出願予定)	3	12	10(2)	25(2)件
論文(査読付き)	0	0	0	0件
研究発表・講演	0	5	0	5件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0件
展示会への出展	0	1	0	1件

※ : 平成21年8月28日現在

今後の予定 ISCS2009 :2件、ICNS8:4件、応用物理学会:1件、  
電子情報通信学会:1件

64/89



研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
 実用化の見通しについて(成果の実用化可能性)

公開

昭和電工株式会社(高In組成窒化物層成長技術)

対象マーケット例:高周波通信用電力トランジスター、緑～赤色高輝度LED

開発項目 (高In組成GaInNエピ材料)	平成24年 (2012年)	平成25年 (2013年)	平成26年 (2014年)	平成27年 (2015年)	平成28年 (2016年)
○量産技術開発	多数枚炉開発 導入		量産設備 導入		
○エピ技術開発		エピ品質改善		量産技術開発	
○事業性判断		事業性評価	設備投資判断		
○実用化		サンプル出荷開始			
○量産化					製品化

研究開発項目②「高品質大口径エピタキシャル成長技術の開発」  
 実用化の見通しについて(成果の実用化可能性)

公開

高Al組成窒化物層成長技術(住友電気工業株式会社)

本PJの開発

高品位・大口径  
高Al組成  
AlGaInエピ基板

実用化開発

大口径HEMT用  
エピ基板実用化

ターゲット例

大電力駆動電子デバイス  
⇒ 電力制御用インバータ 等

課題 低コスト化(多数枚化、大面積チップの歩留まり向上)  
 対応方針 多数枚量産MOVPE装置の開発  
 市場立上 2015年頃、1000枚/月程度からを予想

見通し

	~H23 (~2011)	H24 (2012)	H25 (2013)	H26 (2014)	H27~ (2015~)
高Al組成エピ基板	本PJ開発			実用化	
多数枚MOVPE装置の開発		設計 製作	導入	量産化条件出し	サンプル出荷 量産化 ~1000枚/月 事業化

「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発  
—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長  
技術の開発」(中間評価)

(2007年度～2011年度 5年間)  
プロジェクトの詳細(公開)

研究開発項目③

「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの  
作製と評価」

2009年 8月31日

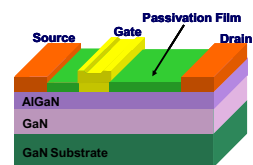
プロジェクトリーダー

福井大学 教授 葛原 正明

67/89

(1) 横型電子デバイスの評価

- ・ TEGパターンの標準化／プロセス  
要因の除去／基板・エピ品質評価

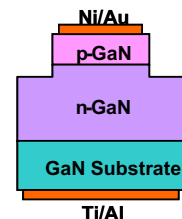


(2) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

- ・ 各種FET、SBDの評価／転位密度の  
影響の評価／熱抵抗、信頼性の評価

(3) 縦型電子デバイスの評価

- ・ 縦型p-nダイオード評価／結晶欠陥  
可視化／GaN MOS／AlN導電性制御



(4) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

- ・ DH構造／ノーマリーオフ動作／高Al,  
高In組成デバイス／デバイスシミュレーション

68/89

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(中間目標の達成度)

公開

目標と達成状況

研究開発項目③

窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価

	最終目標	中間目標	成果	中間目標達成度	最終目標達成の課題
③窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価	有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化	窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化	GaN基板上FETにて高ドレイン電流を確認	○	・無極性基板上のデバイス試作の加速
	広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバック	基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバック	縦型ダイオードにて基板/エピ界面の品質と耐圧特性との相関を確認	◎	・基板/エピ層の品質向上による耐圧向上の確認と考察

◎:当初計画以上の成果 ○:今年度達成・達成見込み △:来年度以降

69/89

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(中間目標の達成度)

公開

窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化

- ・自立GaN基板上に横型ヘテロ接合FETを試作評価
- ・Si基板上的同構造FETに比べて20%以上高いドレイン電流を確認

基板/エピ層の品質とデバイス特性との関係の明確化と課題①、②へのフィードバック

- ・自立GaN基板上に横型ヘテロ接合FETおよび縦型ダイオードを試作し耐圧特性を評価
- ・基板の転位密度(エピ層に伝播)が逆方向リーク電流に影響することを確認し、その結果を課題①、②にフィードバック

70/89

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(研究開発計画)

公開

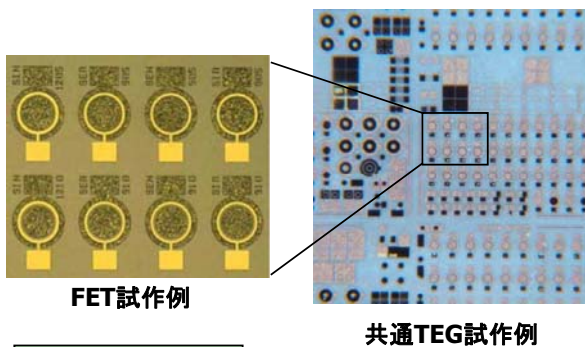
目的・意義	窒化物半導体基板上に各種TEGやデバイスを試作し、課題を単結晶基板開発グループおよびエピタキシャル成長技術開発グループへフィードバックする。
①H21中間目標	①窒化物単結晶基板上FETと他種基板上FETの特性の差異およびその利害得失の明確化
②最終年度目標	②有極性単結晶基板上FETと無極性基板上FETの特性の差異およびその利害得失の明確化

		平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22-23年度
1	横型電子デバイスの評価	プロセス検討 マスク設計	TEG試作・評価 デバイスプロセス開発	TEG試作・評価 短ゲート化	大口径基板でTEG 試作・評価 新構造FET検討
2	縦型電子デバイスの評価	基礎検討	縦型p-nダイオード試作 結晶欠陥評価	縦型p-nダイオード試作 耐圧改善 MOS絶縁膜検討	高耐圧p-nダイオードの 試作・縦型トランジスタ 試作・評価
3	窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認	基本評価方法検討	非接触評価装置 各種基板上にデバイス 試作	初期信頼性評価 実機デバイス評価	信頼性評価 歩留まり評価 基本回路実証
4	有極性、及び無極性デバイス構造の比較	プロセス検討 シミュレーション	TEG試作・評価 シミュレーション	結晶エッチング導入 無極性FET試作評価	無極性新構造FET 高In組成チャンネル AlN基板上FET

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(1)横型電子デバイスの評価

公開

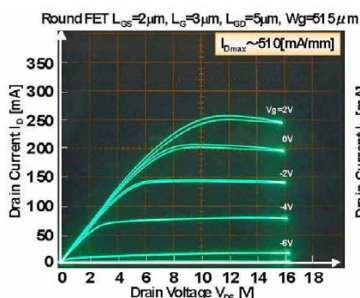
(1) 横型電子デバイスの評価



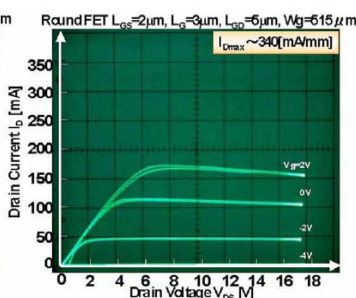
FET試作例

共通TEG試作例

510mA/mmを確認



PJ内製エピ基板でのFET特性



市販GaN on Siエピ基板でのFET特性

目的

- ・窒化物エピ基板上に横型FET試作・フィードバック

方法

- ・共通TEGマスクを使用
- ・Naフラックス基板とエピを用いて試作・評価

成果

- ・Naフラックス基板上有極性AlGaIn/GaNエピ上にHEMT試作
- ・ $I_{dmax}=510mA/mm$ 確認

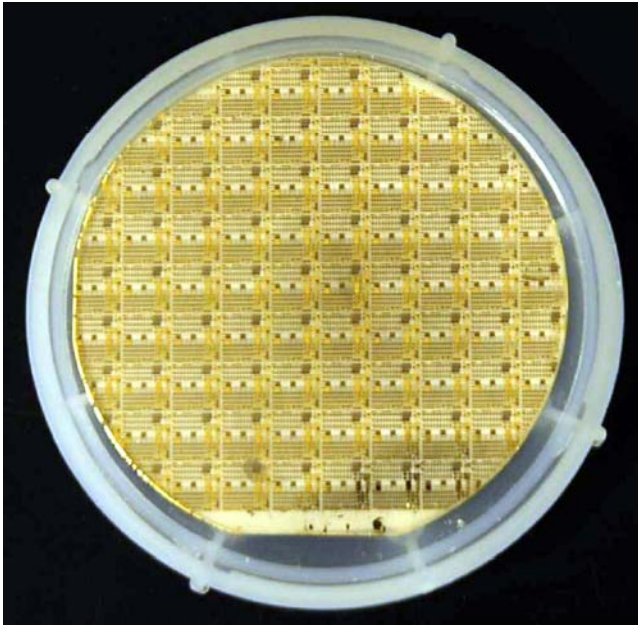
展望

- ・2インチΦ窒化物基板上にFET試作・フィードバック

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(1)横型電子デバイスの評価

公開

(1) 横型電子デバイスの評価



2インチGaN有極性基板上的HEMT-TEG

目的

- ・2インチ有極性GaN基板とHEMTエピの品質と均一性をHEMT特性を通して評価

方法

- ・2インチGaN基板全面にFETを試作

成果

- ・良好な均一性を確認
- ・電流密度250mA/mm以上
- ・ドレイン耐圧350V以上確認

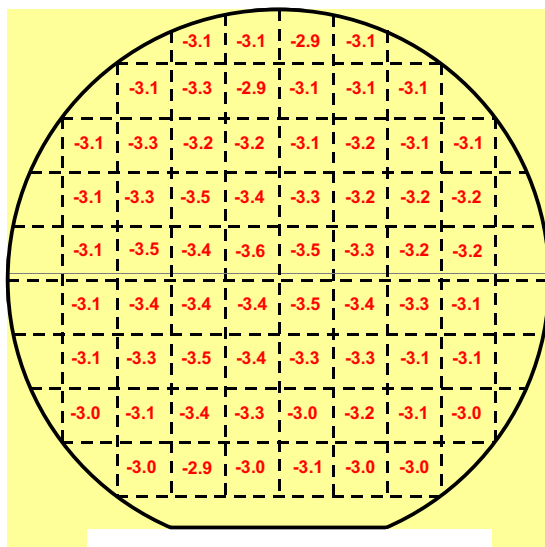
展望

- ・保護膜による動作安定化
- ・ドレイン電流密度の向上
- ・更なる耐圧向上

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(1)横型電子デバイスの評価

公開

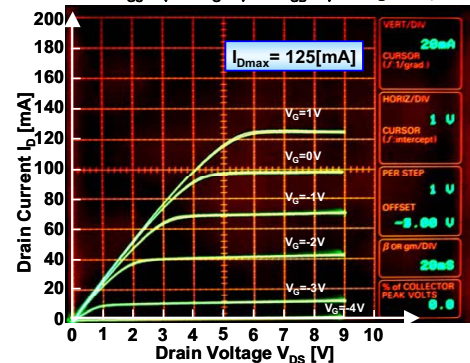
(1) 横型電子デバイスの評価



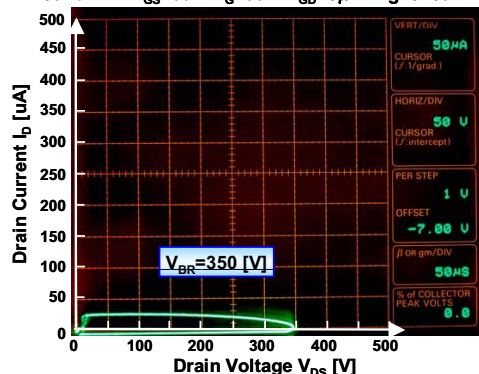
しきい値電圧の面内分布

優れた面内均一性を確認  
フィードバック

Round FET  $L_{GS}=3\mu m, L_G=3\mu m, L_{GD}=5\mu m, Wg=515\mu m$



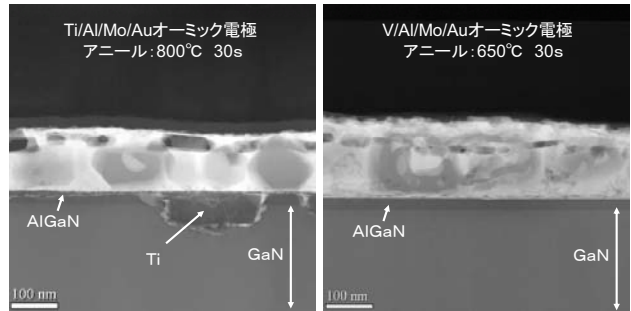
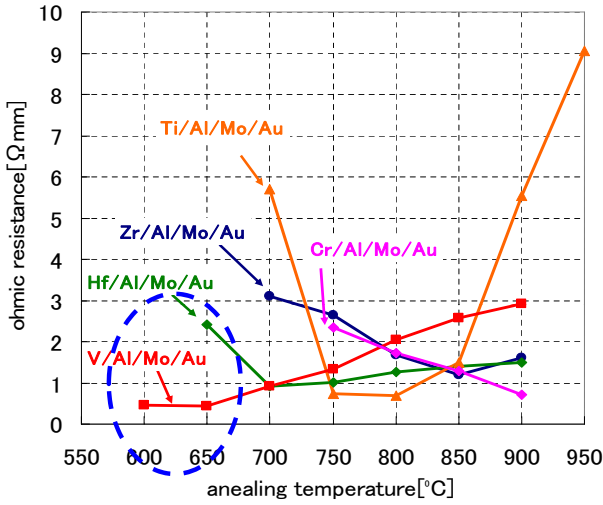
Round FET  $L_{GS}=3\mu m, L_G=3\mu m, L_{GD}=5\mu m, Wg=515\mu m$



研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(1)横型電子デバイスの評価

公開

(1) 横型電子デバイスの評価



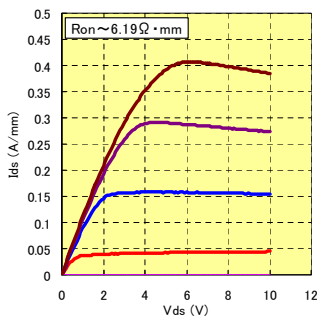
オーミック接触界面の断面TEM観察

- ・低温アニール(600-650°C)にてV/Al/Mo/Auオーミック電極の良好な特性を確認
- ・従来のTi/Al/Mo/Au電極よりHEMTの高耐圧特性を確認(BV=250V→350V)
- ・アニール後の金属/半導体界面の良好な平坦性を確認

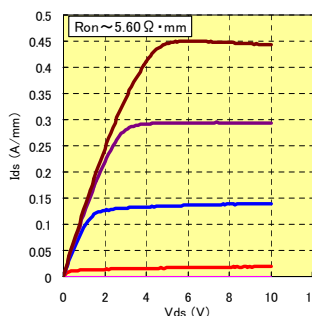
研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(3)窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

公開

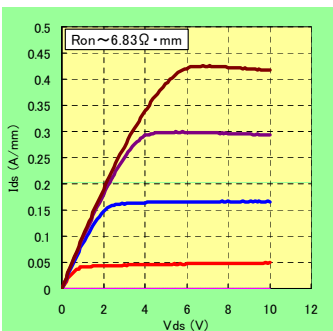
(3) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認



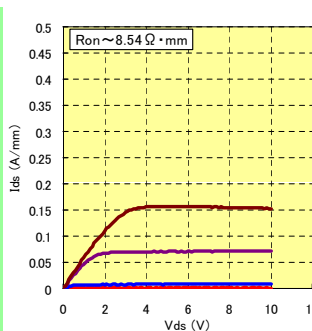
Si基板上HEMT



SiC基板上HEMT



GaN基板上HEMT



Sapphire基板上HEMT

目的

- ・他種基板(Si, SiC, Sapphire)上のデバイス特性比較を通してGaN基板上デバイスの優位性確認

方法

- ・各基板上に標準HEMT(円形ゲート構造, Lg=2μm)を試作
- Al組成: 26%

成果

- ・Id, gm特性はほぼ同等
- ・GaN基板上で低耐圧

展望

- ・縦耐圧向上の検討
- ・熱抵抗/信頼性評価

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(3)窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

公開

## (3) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

基板	最大 $I_d$ (mA/mm)	最大 $g_m$ (mS/mm)	$V_{th}$ (V)	耐圧 (V)	オン抵抗 ( $\Omega$ mm)
Si	407	136	-2.9	640	6.2
SiC	449	170	-2.5	630	5.6
GaN	425	144	-2.9	130	6.8
Sapphire	157	90	-1.4	>1000	8.5

77/89

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(3)窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

公開

## (3) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

## 目的

- ・GaN基板上FETの耐圧を決定する縦方向耐圧の向上

## 方法

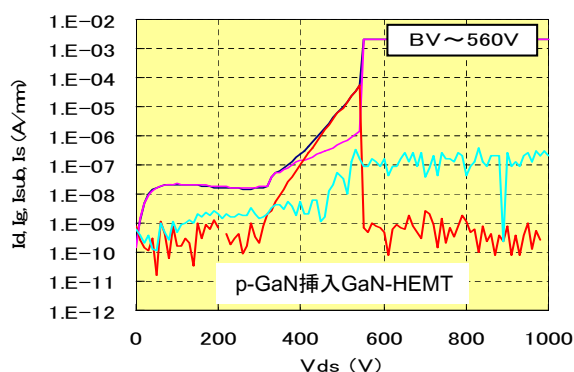
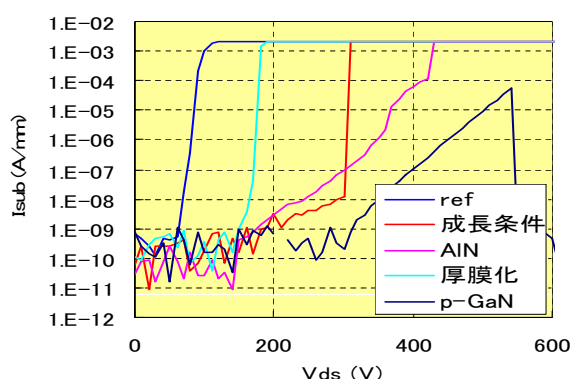
- ・AlNの挿入、エピ厚の増加、p-GaN層の挿入などを検討

## 成果

- ・AlN層の挿入により耐圧向上を確認(しかし、結晶性劣化と基板反りの増加を伴う)
- ・p-GaNの導入により耐圧向上を確認(しかし、オン抵抗増を伴う)

## 展望

- ・結晶性向上を含めて検討継続

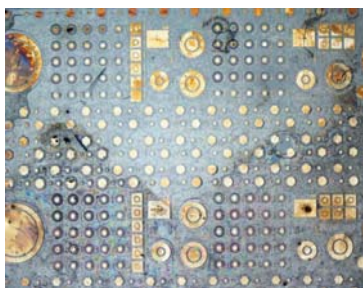


78/89

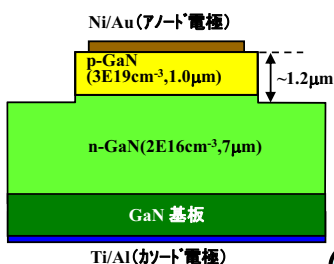
研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(2)縦型電子デバイスの評価

公開

(2) 縦型電子デバイスの評価



試作ダイオードパターン



p-nダイオード断面構造

縁面放電抑制のため  
フロリナート中で評価

目的

- ・本Pj Naフラックス基板の優位性を確認する

方法

- ・市販HVPE基板上p-nダイオードと耐圧特性を比較する

成果

- ・耐圧1kV以上のダイオード特性を確認
- ・市販HVPE基板に対し、Naフラックス基板の優位性ありと判断

展望

- ・結晶品質・欠陥と耐圧特性との相関検討

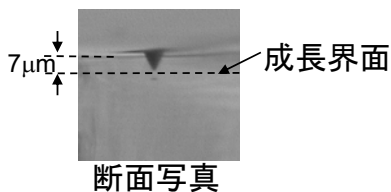
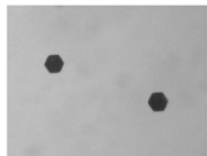
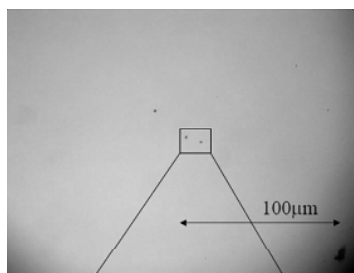
研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(2)縦型電子デバイスの評価

公開

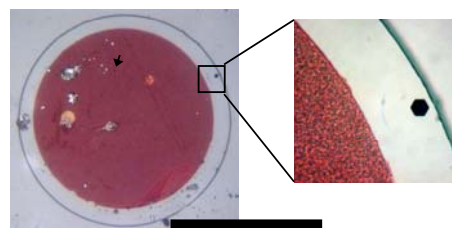
(2) 縦型電子デバイスの評価

成長時、六角錐のピットが生じる。

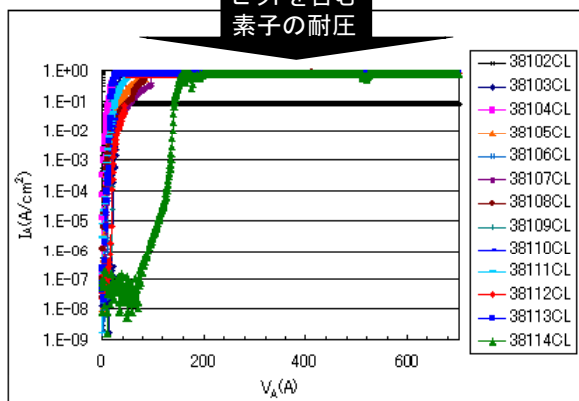
ダイオード内にあるとほとんど耐圧が出ない



断面写真



ピットを含む素子の耐圧



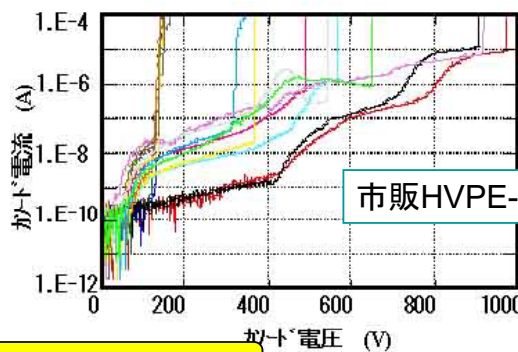
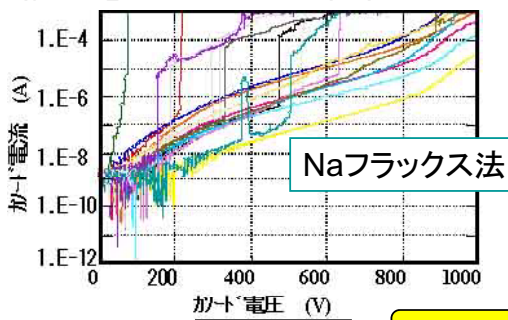
基板表面から発生 ⇒ 基板に原因あり? ⇒ 基板グループに改善要請



研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(2)縦型電子デバイスの評価

公開

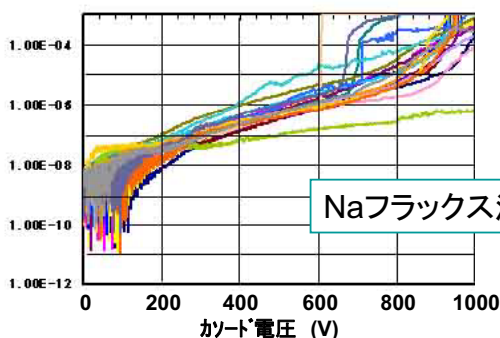
(2) 縦型電子デバイスの評価



表面処理、  
結晶性改善

基板対策:ピットの出現数減少

- ・素子特性のばらつき低減
- ・1kV以上の耐圧(n-GaN:7μm)
- ・良好なリーク特性を示す部分あり (1kVで<1μAのリーク電流)



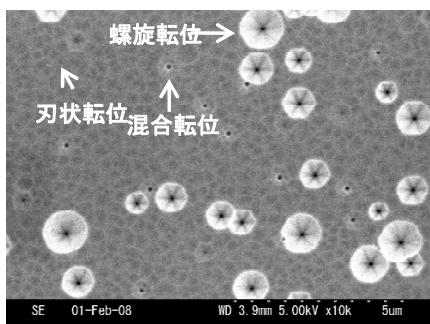
Naフラックス法

今後:・リーク電流の原因の明確化 (メサ端面、欠陥)  
・エピでのピット発生抑制検討

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(2)縦型電子デバイスの評価

公開

(2) 縦型電子デバイスの評価



目的

- ・貫通転位とp-nダイオードリーク電流との相関を調べる

方法

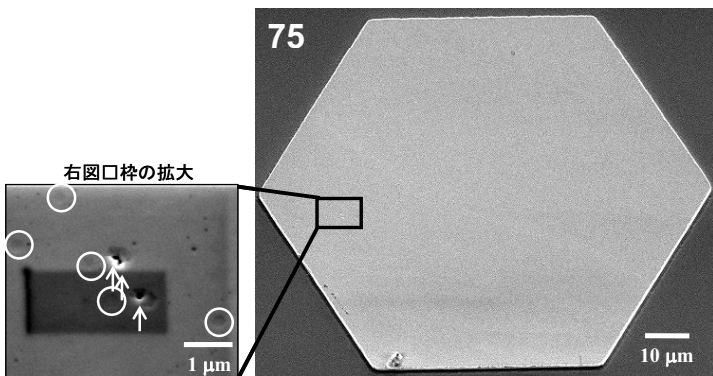
- ・HClによる気相エッチングにより、エッチピットを観察

成果

- ・螺旋転位、混合転位、刃状転位を分離
- ・螺旋・混合転位がリークパスとなる可能性を確認

展望

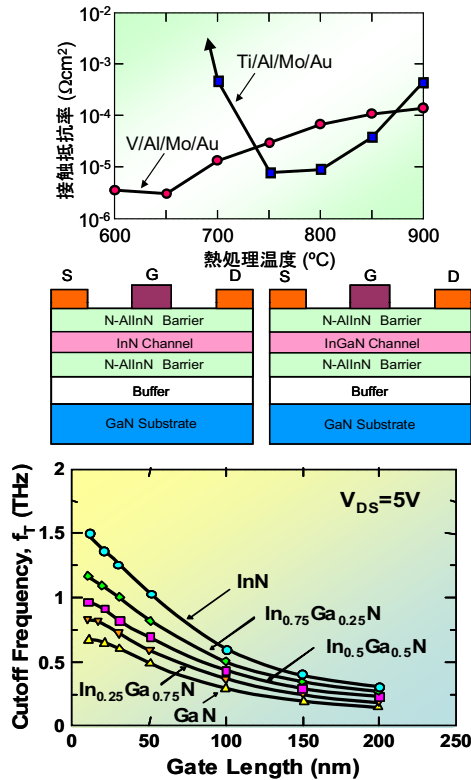
- ・ダイオードリーク電流の起源を考察し、低リーク電流化を図る



研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(4)有極性および無極性デバイス構造の比較

公開

(4) 有極性および無極性デバイス構造の比較



目的

- ・有極性および無極性GaN基板上に試作したFETの差異を明らかにする。

方法

- ・各種GaN基板上にデバイスを作製

成果

- ・低抵抗オーミック電極を検討
- ・高In組成InGaNチャネルの高周波特性を理論予測

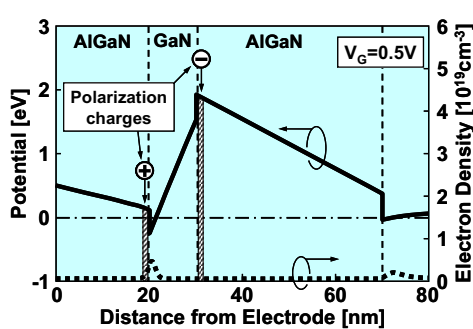
展望

- ・無極性基板上にデバイス試作 評価・フィードバック

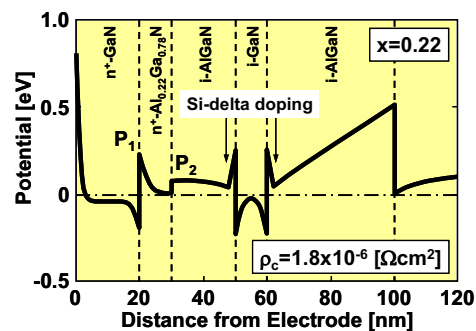
研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(4)有極性および無極性デバイス構造の比較

公開

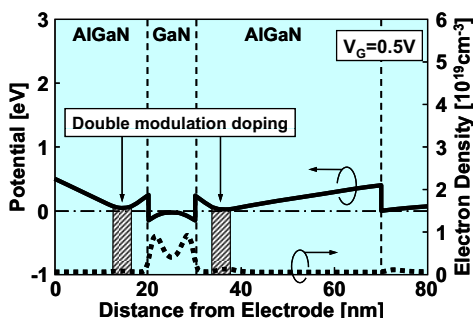
(4) 有極性および無極性デバイス構造の比較



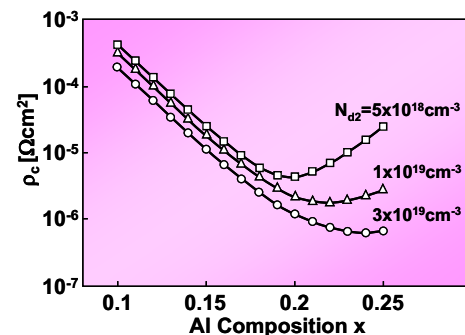
有極性DH-HEMT構造



N-AlGaIn中間層の導入による低接触抵抗化



無極性DH-HEMT構造



接触抵抗のAl組成依存性

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(耐圧改善の歩みと協力体制)

公開

	~2008.4	2008.9	2008.11	2009.5	2009.7
基板	GaN (市販)	GaN (阪大) 15mm角	GaN (市販)	GaN (市販)	GaN (市販) 2inch GaN (阪大) 15mm角
エピ	名城大 凹凸あり	名城大 Al=27%	名城大 Al=24%	名城大 HF処理 pバッファ	名城大
デバイス特性	リーク電流大 ピンチオフせず 耐圧~0V	ピンチオフ率20% 耐圧~10V Id=510mA/mm	ピンチオフ率50% 耐圧~50V	ピンチオフ率70% 耐圧~100V	ピンチオフ率90% 耐圧~350V
フィードバック	バッファ耐圧改善 結晶品質改善 均一性改善	バッファ耐圧改善 Al混晶比最適化 均一性改善	Al=24%でOK バッファ耐圧改善 均一性改善	HF処理効果小 バッファ耐圧改善 基板大型化	HF処理効果小 耐圧改善確認 基板大型化
その他	サンケン電気 Si基板とGaN基板 デバイス試作評価	耐圧 ~130V(GaN基板) ~600V(Si基板)	シャープ 福井大 オーミック金属と耐圧 V/Al/Mo/Auの検討	耐圧 ~230V(従来金属) ~360V(V系金属)	

デバイスグループにて会合(4,7,11月)  
基板と耐圧について議論  
結晶欠陥評価を豊田中研に依頼

福井大にて3端子耐圧を解析  
バッファ内漏れ電流の存在を実証  
IMFEDK2009@関西大にて発表

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
研究開発成果について(知財と標準化及び成果の普及)

公開

知的財産権、成果の普及

	H19	H20	H21	計
特許出願(出願予定)	0	1	1(2)	2(2)件
論文(査読付き)	1(1)	2(2)	2(2)	5(5)件
研究発表・講演	4	5	2	11件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0件
展示会への出展	0	1	0	0件

※ 平成21年8月28日現在

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価」  
 実用化の見通しについて(成果の実用化可能性)

公開

	平成19～23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度
サンケン電気(株) デバイス及び応用製品 (電源、インバータ等)	本プロジェクトの推進 →	基板実用化待ち ←		実用化
	GaN基板上デバイスの 優位性確認 (性能、コスト) ←	GaN基板上デバイスの開発 →	信頼性確認、パッケージ等の開発 →	サンプル出荷、試験生産、スイッチング 電源・インバータ等の開発、量産 →
平成26年度までに一部実用化を目標とする				

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価」  
 実用化の見通しについて(波及効果)

公開

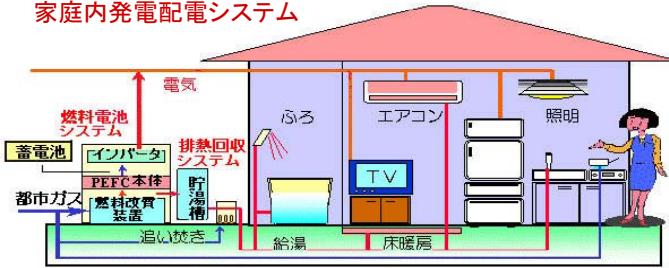
	平成19～23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度以降
シャープ(株) パワーデバイス	→	実用化・事業化課題の明確化 (コスト、性能、信頼性など) →	実用化	平成25年度以降 実用化検討
	本プロジェクトの 推進	グループ企業にてハイブリッド車用 パワーデバイスとして実用化をめざす →		平成32年度前後 実用化目標

研究開発項目③「窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの作製と評価」  
実用化の見通しについて(波及効果)

公開

実用化のイメージ

家庭内発電配電システム



室外機の小型化  
と省エネ化



バッテリーアダプタ  
の小型内蔵化



発電効率の向上と小型化



ハイブリッド自動車の高出力・  
冷却軽減・省エネ化

