

## イオン注入による p 型 GaN の作製に世界で初めて成功 縦型および横型 GaN on GaN デバイス試作ライン稼働スタート

名古屋大学未来材料・システム研究所の 加地 徹 特任教授 らの研究グループは、大学院工学研究科の 須田 淳 教授を施設長とするクリーンルーム (C-TEFs) において、以下の研究成果をおさめました。

GaN パワーデバイスの最大障壁であったイオン注入により面内伝導型制御ができない課題に対して、イオン注入後、超高压化状態で熱処理することにより、世界で初めて安定した p 型結晶を作製することに成功しました。これは、将来の GaN デバイス集積回路実現へつながる画期的成果です。また、クリーンルーム (C-TEFs) での GaN 基板上的縦型 GaN トレンチ MOSFET および横型 GaN HEMT の基本プロセス条件を確立しました。これにより、2019 年 4 月より、デバイス作製サービスを開始しました。

本研究は、平成 28 年度から始まった文部科学省『省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発』の一環として行われました。

### 【ポイント】

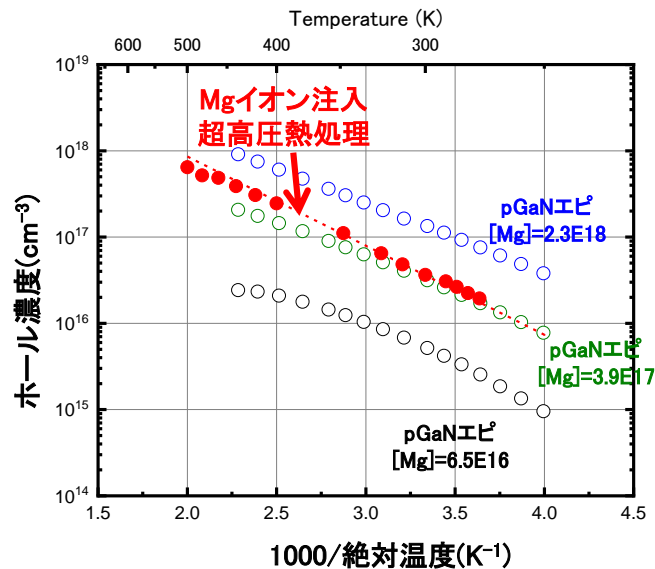
- 世界で初めてイオン注入により、高品質な p 型結晶を作製することに成功。
- 将来の GaN デバイス集積回路実現へとつながる画期的成果。
- GaN 専用クリーンルーム (C-TEFs) でのウェハ供給体制が整い、企業や研究機関へデバイス作製サービスを開始。

### 【研究背景と内容】

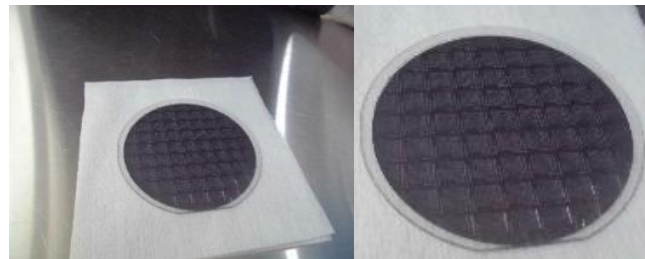
(実施機関:名古屋大学)

イオン注入によるウェハ面内での伝導型制御は、単元素半導体である Si では一般に用いられており、IC、LSI の製造では欠かせない技術です。しかし GaN では、これまでイオン注入後の熱処理によ

る結晶構造破壊の回復が十分にできず、高品質な結晶層の形成を実現できていませんでした。このため、高耐圧構造の作製や集積回路デバイス作製の際の大きな足かせとなっていました。本研究で開発された超高窒素圧下で熱処理を行う方法により、世界で初めて高品質な p 型 GaN 層の作製に成功しました。下図に示すように、p 型 GaN エピタキシャル成長<sup>注1)</sup>した試料と同等のホール<sup>注2)</sup>が発生していることを確認しています。



下図の左が GaN 基板上縦型トレンチ MOSFET、右が GaN 基板上横型 HEMT のウェハです。大きさは何れも 2 インチで、名大内 C-TEFs で開発したプロセス技術を基に作製されています。標準プロセスでの総ステップ数は、縦型が 221 ステップ、横型が 228 ステップとなります。2019 年 4 月より、デバイスウェハ提供サービスを始めました。



### 【成果の意義】

高耐圧パワーデバイスおよび高耐圧 pn ダイオード<sup>注3)</sup>やショットキーバリアダイオード<sup>注4)</sup>が形成可能となるため、高耐圧・低オン抵抗<sup>注5)</sup>トランジスタ実現のキーテクノロジーとなります。また、平面内 pn 接合が形成可能なため、将来は集積回路素子への応用も期待されます。更に、GaN 専用クリーンルーム(C-TEFs)を活用することにより、GaN on GaN<sup>注6)</sup>デバイスの社会実装に寄与します。

### 【用語説明】

- 注 1) エピタキシャル成長：基板となる結晶の上に結晶成長を行い際、下地の基板の結晶面にそって成長する。
- 注 2) ホール：正孔のことで、半導体において価電子帯の電子が不足した状態を表す。
- 注 3) pn ダイオード：p型半導体とn型半導体が一つの結晶内でつながったものをPN接合と呼び、

その接合を使用したダイオード

- 注4) ショットキーバリアダイオード：金属と半導体が接合した際に発生する障壁をショットキーバリアと呼び、それを用いたダイオード
- 注5) 低オン抵抗：トランジスタ動作時のドレインとソース間の抵抗値をオン抵抗と呼び、その値が小さなもの
- 注6) GaN on GaN：GaN 基板上に形成された GaN デバイスを表す

# 大電流チップ歩留まり向上のための結晶成長技術 気相成長マルチフィジックス統合シミュレーション技術確立

名古屋大学未来材料・システム研究所の 天野 浩 教授らの研究グループは、以下の研究成果をおさめました。

GaN パワーデバイスの大電力化に際して障害となっていたキラ欠陥密度を従来の 30 分の 1 に低減し、パワーデバイスの実用化が一気に進むと言われていた大電力 (100A) チップの歩留まりを大幅に向上しました。さらに、GaN の結晶成長において、GaN 表面の Ga 原子挙動とアンモニア分子吸着の原子レベルでのシミュレーション開発を行い、結晶成長への AI 応用としてのプロセスインフォマティクス<sup>注2)</sup>の先駆けとなる技術を構築しました。

本研究成果は、学術雑誌 Applied Physics Letters(April, 2018)、Journal of Crystal Growth(February, 2019)などで報告しています。

本研究は、平成 28 年度から始まった文部科学省『省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発 (中核領域)』の一環として行われました。

## 【ポイント】

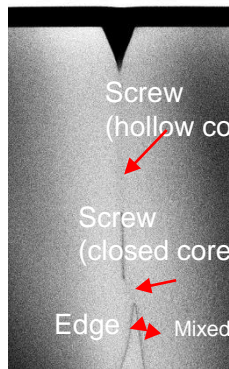
- GaN パワーデバイスの大電力化に際して課題であったキラ欠陥<sup>注1)</sup>密度を低減
- チップ歩留まりの大幅な改善を実現し、大電力パワーデバイス実用化に向けて大きく前進
- GaN 結晶作製方法に対して、プロセスインフォマティクス<sup>注2)</sup>の先駆けとなる技術を構築

## 【研究背景と内容】

(実施機関:名古屋大学)

GaN パワーデバイスを実現するには、大面積で高品質な結晶を実現する必要があります。本研究グループでは、GaN 高耐圧ダイオード<sup>注3)</sup>の漏れ電流の起源を徹底的に調査し、図1中で Screw と表示している螺旋転位<sup>注4)</sup>によってできるナノパイプの一部で電流が漏れていることを突き止めました。その結果を基に、有機金属気相成長(MOVPE)<sup>注5)</sup>における結晶成長条件を改善し、昨年報告した pn ダイオード動作での実証段階から、今年度は大電力用デバイスとして実用化レベルである 100A チップの歩留まりが、研究開始時はほぼ 0%であった水準から 30%へと大幅な向上を実現しました。

また、MOVPE における原料ガスの反応過程を詳細に検討した結果、Ga 原料であるトリメチルガリウムは、従来考えられていたアンモニアと気相で反応してアダクト<sup>注6)</sup>を形成するのではなく、単独で分解する過程が支配的であることを明らかにしました。この結果を基に、金属 Ga の GaN 表面での振る舞いをポスト「京」プロジェクトと共同でシミュレーションしたところ、図2に示すように二次元液体<sup>注7)</sup>のように振る舞うことを初めて明らかにしました。この結果、GaN の結晶成長プロセスにおけるインフォマティクスの技術の先駆けとなる手法を構築したことにより、第一原理計算<sup>注8)</sup>による製造装置設計への道を拓きました。



キラ欠陥

図1 螺旋転位によるナノパイプ形成  
によるキラ欠陥発生

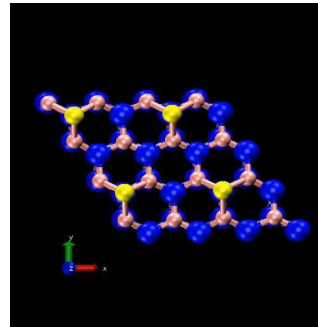


図2 ポスト「京」による GaN 表面での  
Gaの振る舞いのシミュレーション

### 【成果の意義】

本研究では、GaN デバイスの社会実装を加速するために、デバイス要素技術の確立とその低コスト化を目指しており、今回の取り組みにより大電力 GaN パワーデバイスの実用化が大幅に加速されました。また、プロセスインフォマティクスによる次世代製造装置設計用シミュレータ実現に向けた基盤を確立できました。

これらの研究成果は、学術雑誌 *Applied Physics Letters*(April, 2018)、*Journal of Crystal Growth*(February, 2019)などで報告しています。

### 【用語説明】

- 注1) キラ欠陥: 半導体結晶中の転位等のデバイス性能に致命的な影響を与える欠陥
- 注2) インフォマティクス: 特殊化された情報の管理やデータ処理、情報知識の統合、概念的または理論的な情報の統合といった事柄を示す。
- 注3) 高耐圧ダイオード: 高耐圧で高電流に対応したダイオード
- 注4) 螺旋転位: 転位線と原子位置のずれの量と方向を表しているバーガス・ベクトルが平行で転位線に対して平行に結晶面がずれているもの
- 注5) 有機金属気相成長: MOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) 原料として有機金属化合物ガスを用いた結晶成長方法
- 注6) アダクト: 複数の段階からなる化学反応過程中に形成される中間体
- 注7) 二次元液体: 平面上で液体のような挙動を示すもの
- 注8) 第一原理計算: 量子力学のシュレディンガー方程式に則って、物質中の電子の運動やエネルギーについてコンピュータを用いて計算する方法

# 世界初 Mg イオン注入法による高品質 p 型 GaN の形成 ～ GaN パワーデバイス作製プロセスの難所を克服～

名古屋大学未来材料・システム研究所の加地 徹 特任教授らの研究グループは、以下の研究成果をおさめました。

GaN パワーデバイス製造工程で必須技術となる選択イオン注入による導電型制御に対して、世界初の Mg イオン注入による高品質 p 型 GaN の形成を実現しました。

本研究では、GaN 基板上的 GaN デバイス(GaN on GaN デバイス)の社会実装を加速するために、デバイス要素技術の確立とその低コスト化を目指しており、これまでの取り組みで、最難関課題に対する技術を確立することができました。

これらの研究成果の記載の詳細は、7月に米国で開催される窒化物半導体国際会議で発表を予定しています。

この研究は、平成 28 年度から始まった文部科学省『省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発』の支援のもとで行われたものです。

## 【ポイント】

GaN パワーデバイス製造工程で必須技術となる選択イオン注入による導電型制御に対して、新規開発の超高压高温処理を用いることで世界初の Mg イオン注入による高品質 p 型 GaN の形成を実現。

## 【研究背景と内容】

(実施機関:名古屋大学)

名古屋大学の赤崎教授、当時、学生の天野教授らがエピタキシャル成長<sup>注1)</sup>で Mg 添加<sup>注2)</sup>により p 型 GaN<sup>注3)</sup>の実現に世界で初めて成功したのは 1989 年のことでした。p 型 GaN の実現により GaN pn 接合の作製が可能となり、青色 LED や青紫色 LED が実現されました。

一方、GaN のパワーデバイスの実現には、素子のある部分にのみ p 型 GaN を形成することが必要です。そのために半導体製造技術ではイオン注入<sup>注4)</sup>による選択的導電型制御<sup>注5)</sup>が一般的です。しかし、GaN については Mg をイオン注入してもうまく p 型にならないということが 30 年近く続いていました。名古屋大学では、文部科学省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」事業でこの問題に取り組み、超高压・高温熱処理によりイオン注入後の活性化を行う方法を開発し、世界初のイオン注入による高品質 p 型 GaN の実現に成功しました。

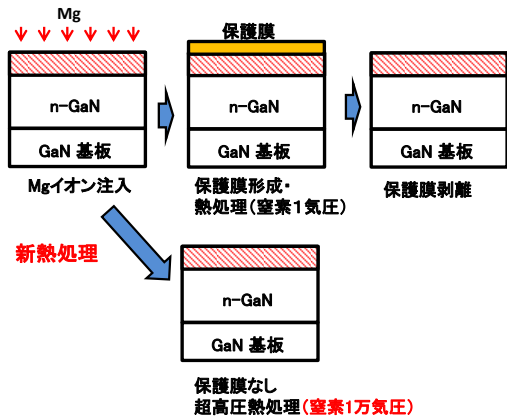


図1 イオン注入した Mg の活性化方法  
従来法は保護膜を形成して1気圧の窒素中で加熱処理するが、新方法は保護膜なしで1万気圧の窒素中で加熱処理する。

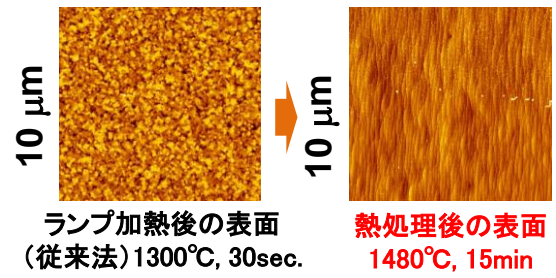


図2 活性化(熱処理)後の GaN 表面  
従来法では表面が荒れるが、新熱処理では保護膜無しでも平坦な表面が保たれる。

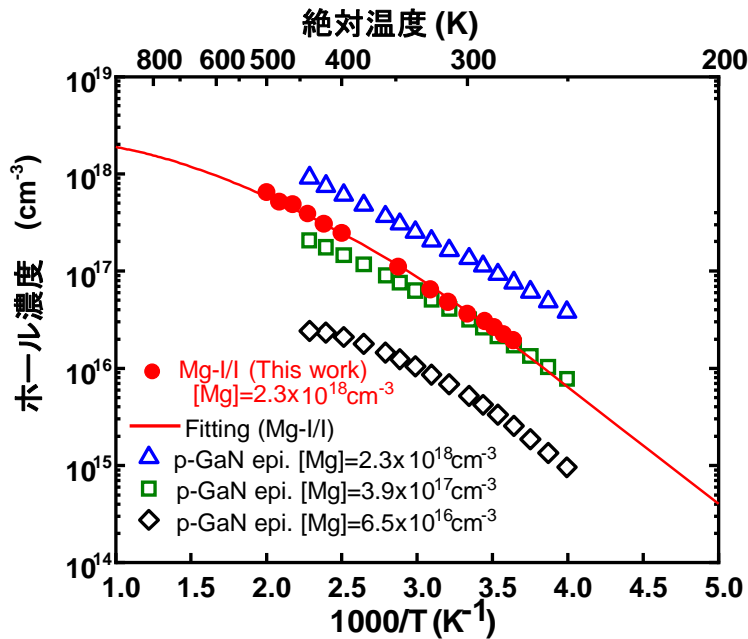


図3 新熱処理法で活性化したイオン注入 Mg 層のホール測定結果  
p 型 GaN エピタキシャル成長した試料と同等のホールが発生している (p 型 GaN ができている) ことが確認された。(世界初)

## 【成果の意義】

高耐圧パワーデバイスおよび高耐圧 pn ダイオード<sup>注6)</sup>やショットキーバリアダイオード<sup>注7)</sup>が、イオン注入により形成可能となるため、高耐圧・低オン抵抗<sup>注8)</sup>トランジスタ実現のキーテクノロジーとなります。また、平面内 pn 接合が形成可能なため、将来は集積回路素子への応用も期待されます。

この結果の詳細は、7月に米国で開催される窒化物半導体国際会議で発表予定です。

## 【用語説明】

- 注1) エピタキシャル成長：結晶基板の上に基板と同様な結晶構造を持つ物質を成長する手法。
- 注2) Mg 添加：半導体結晶の物性を変化させるために Mg を添加することでドーピングとも言う
- 注3) p 型 GaN：電荷を運ぶキャリアが正孔である p 型の GaN
- 注4) イオン注入：n 型、p 型の不純物原子をイオン化し、これに電界を印加して加速し、そのイオンを半導体に強制的に注入し、熱処理して n 型、p 型を形成する手法。
- 注5) 選択的導電型制御：部分的に n 型と p 型の導電性を作りこむこと。
- 注6) pn ダイオード：p 型半導体と n 型半導体が一つの結晶内でつながったものを PN 接合と呼び、その接合を使用したダイオード
- 注7) ショットキーバリアダイオード：金属と半導体が接合した際に発生する障壁をショットキーバリアと呼び、それを用いたダイオード
- 注8) 低オン抵抗：トランジスタ動作時のドレインとソース間の抵抗値をオン抵抗と呼び、その値が小さなもの



# 名古屋大学 C-TEFs 横型 GaN HEMT 基本条件確立完了

名古屋大学大学院工学研究科の須田 淳 教授 らの研究グループは、以下の研究成果をおさめました。

GaN 基板上的 GaN デバイス開発を可能とする実験施設 C-TEFs において、これまでの縦型パワーデバイスに加え、高周波デバイスの基本構造である横型 GaN 高電子移動度トランジスタの基本プロセス条件を確立しました。これにより、2019 年 4 月よりデバイス作製サービスを開始しました。

本研究グループでは、GaN 基板上的高周波 GaN デバイス(GaN on GaN デバイス)の社会実装を加速するために、デバイス要素技術の確立とその技術に基づく GaN on GaN の特長を活かした横型デバイスの研究開発を進めています。この度、研究開発の基盤となるデバイスの基本プロセスを確立しました。

この研究は、平成 28 年度から始まった文部科学省『省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発』の支援のもとで行われたものです。

## 【ポイント】

GaN の結晶・デバイスに特化した C-TEFs において、これまで研究開発を進めてきた縦型 GaN パワーデバイスに加え、高周波デバイスの基本構造である横型 GaN HEMT<sup>注1)</sup>の研究開発を進めるための基盤を確立。

## 【研究背景と内容】

(実施機関:名古屋大学)

2018 年 7 月に名古屋大学に開所した CIRFE<sup>注2)</sup> Transformative Electronics Facilities (C-TEFs、名古屋大学エネルギー変換エレクトロニクス実験施設)は、世界に類を見ない GaN の結晶・デバイスに特化した大規模実験施設(クリーンルーム)であり、文部科学省『省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発』事業のもと、高品質の基板材料製造技術や縦型 GaN パワーデバイスの研究開発を進めてきました。

2018 年度、前期の研究開発事業において、高周波デバイス・システム領域が新たに設置され、委託テーマとして採択されたことに伴い、これまでの縦型デバイスに加え、高周波デバイスの基本構造である横型 GaN HEMT のプロセス開発を開始しました。既に確立した縦型パワーデバイスの各種技術も活用しつつ、HEMT 特有のプロセス技術の開発を急ピッチで進め、この度開発着手から半年という極めて短期間で基本プロセス条件を確立、これらのプロセスを組み合わせ GaN HEMT の試作を行い、良好なトランジスタ動作を確認しました。

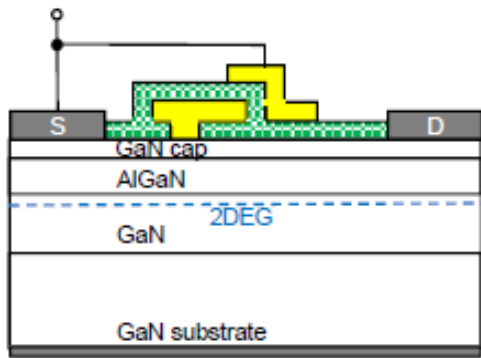


図1 GaN HEMT 構造



図2 試作ウェハ

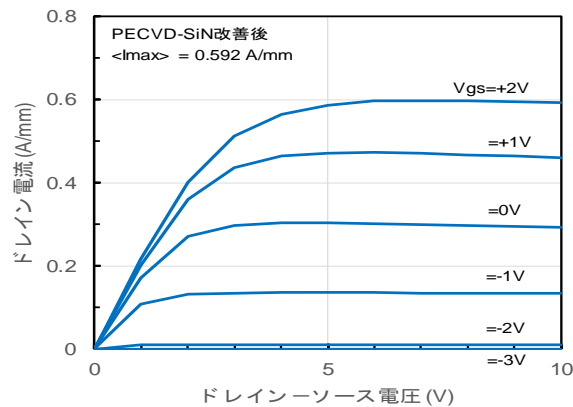


図3 トランジスタ特性

### 【成果の意義】

GaN 横型 HEMT は、これまで GaN on SiC や GaN on Si の研究開発が精力的に行われてきました。C-TEFs において GaN on GaN 注3) のための基本的な GaN HEMT のプロセス条件が確立されたことにより、今後、未開拓領域の GaN on GaN 横型 HEMT の研究開発が大きく進展します。横型 GaN HEMT は、高周波デバイスに加え、過酷な環境に対応したデバイス、センサーなど新領域での利用が考えられ、さらに今回同時に発表する p 型 GaN の形成技術と組み合わせることによる集積回路化により、高周波システムの高機能化、新たな領域の開拓に発展することも期待されます。

### 【用語説明】

注1) HEMT : 高電子移動度トランジスタ (HEMT : High Electron Mobility Transistor)

注2) CIRFE : Center for Integrated Research of Future Electronics

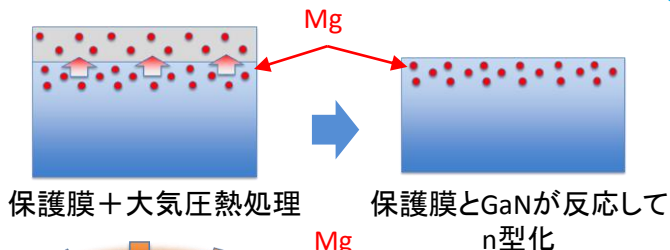
注3) GaN on GaN : GaN 基板上の GaN デバイス。同一半導体のため接合面での結晶欠陥発生が少ないデバイスが実現できる。

## イオン注入によるp型GaNの作製に世界で初めて成功

今回、超高压高温処理によりイオン注入後の活性化を行う方法を開発し、世界初のイオン注入による高品質p型GaNの実現に成功。

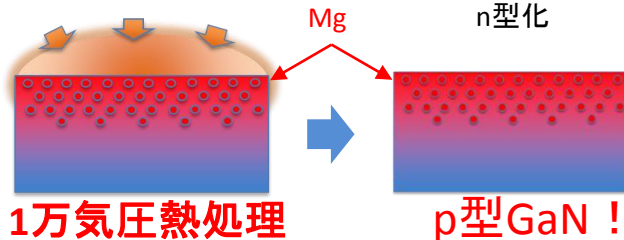
### 従来法

課題：  
保護膜との反応と熱分解による表面の荒れ



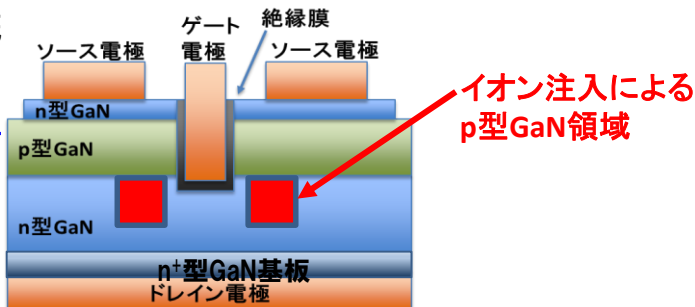
### 新手法

解決策：  
超高压・高温熱処理



## 社会的意義

適用例  
縦型パワー  
トランジスタ



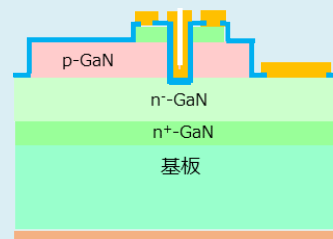
選択的にpn接合形成が可能となり、デバイス高耐圧化が容易  
 →高耐圧・低オン抵抗トランジスタの面積削減(30%以上)  
 将来はGaNデバイス集積回路への応用も期待

## 縦型および横型GaN on GaNデバイス試作ライン稼働スタート



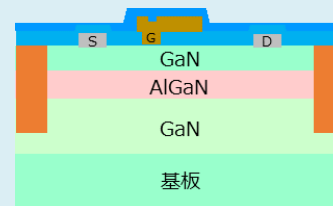
### GaN専用 1000平米クリーンルーム

- ・オリジナル結晶成長装置、評価分析装置、デバイス作製装置を集積
- ・専任のクリーンルーム作業経験者による企業研究所水準の設備運用
- ・名大開発の技術・ノウハウを活用可能なプロセスメニュー



### 標準デバイス試作例

- ・縦型GaNパワーデバイス  
(UMOS vertical Tr with FP termination)
- ・横型GaN高電子移動度トランジスタ  
(HEMT with Boron I/I isolation)
- ・GaNレーザー  
(Ridge waveguide LD)



GaNデバイスの社会実装の加速、死の谷を克服するための産学共創研究、企業の本格的GaNデバイス開発の第一ステップ

## 背景・課題

- 省エネルギー社会の実現に向けて、高電圧・低抵抗で使用でき、大きな省エネ効果が期待される窒化ガリウム（GaN）等の次世代半導体が世界で注目。
- 高品質結晶やデバイス作成の成功により、省エネルギー社会の実現とともに大きな世界市場\*の獲得が可能。



\*パワーデバイス市場見込み：2025年に約3.5兆円（2015年の1.3倍） 出典：2016年版次世代パワーデバイス&パワエレ関連機器市場の現状と将来展望（富士経済）

## 【成長戦略等における記載】

- エネルギーの効率的な利用を図るため、産業、民生（家庭、業務）及び運輸（車両、船舶、航空機）の各部門において、窒化ガリウム等の新材料を用いた次世代パワーエレクトロニクス技術の開発等一層の省エネルギー技術等の研究開発及び普及を図る。＜環境基本計画（2018年4月閣議決定）＞
- マイクロ波無線送電技術の研究開発・実証、各種産業への応用を進め、地域のエネルギーネットワークを強化する。＜未来投資戦略2018（2018年6月閣議決定）＞

## 事業概要

### 【事業の目的・目標】

- GaN等の次世代半導体を用いたパワーデバイス等の2030年の実用化に向けて、2020年度までの事業期間中に結晶作製技術を創出するとともにデバイス作製方法の目途をたてる。

### 【事業概要・イメージ】

- GaN等の次世代半導体に関し、結晶創製、パワーデバイス・システム応用、レーザーデバイス・システム応用、高周波デバイス・システム応用、評価の研究開発を一体的に行う拠点を構築し基礎基盤研究開発を実施することにより、**実用化に向けた研究開発を強化**。
- 名古屋大学が中核となって立ち上げ、多くの企業が参画するGaNコンソーシアム等を活用して、企業との連携を強化し、**実用化に向けた大規模な共同研究を実施**。
- 2019年度より、デバイスの製品化に必要な**回路システムの研究開発を**発展させることにより、**新たな価値を有した革新的な電子デバイス・システムを実現し、世界市場の獲得を目指す**。

### 【事業スキーム】

- ✓ 支援対象機関：大学、国立研究開発法人等
- ✓ 事業期間：2016～2020年度

