

# 環境発電向けのGaNヘテロ構造を用いた 高効率整流用ダイオードの研究

豊田工業大学  
電子デバイス研究室  
岩田 直高

# 電子デバイス研究室 GaN研究のご紹介

## ①環境発電用高効率整流素子の実現に向けて

p型GaNゲートを有する低オン電圧ゲートドアノードダイオードの研究(エネルギーハーベスティング用高効率整流素子開発)

←大分大・企業との共同研究(科研費)

ポスター28

## ②電力制御用高電圧動作縦型素子の実現に向けて

レーザー照射によるMgドープGaNのアクセプタ活性化の研究

←本学(神谷先生)・立命館大との共同研究(科研費)、企業との共同研究

## ③超高速高電圧高電流動作トランジスタの実現に向けて

GaN基板に形成したバッファ層がAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>高電子移動度トランジスタ(HEMT)の特性に及ぼす効果の研究

ポスター27

# 環境発電用高効率整流ダイオード

## 背景

IoT向け環境発電(電波、振動など)用に高効率整流ダイオードが必要

## 現状

- ・Siダイオード：～0.7Vのオン電圧 →低い整流効率
- ・同期整流デバイス →高コスト、パルス高電圧整流不可

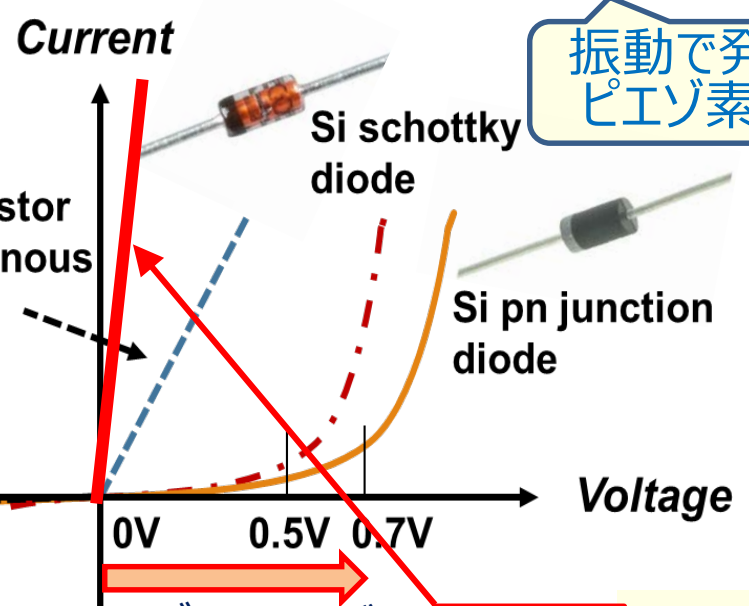
電波は微弱

0Vから整流  
できる高電流  
高耐圧素子  
が必要

振動で発電  
ピエゾ素子

## 対応

- ① p型GaNゲートHEMT(しきい電圧制御可能→0Vから動作へ)
- ② pnダイオード(高電流化)



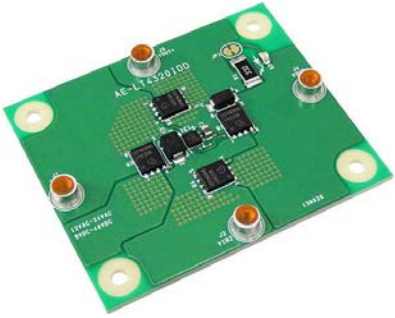
CMOS transistor with synchronous circuit

Si schottky diode

Si pn junction diode

Siダイオードが整流できない順方向電圧

狙いの特性 ゲーテッドアノードダイオード (= ① + ②)の開発

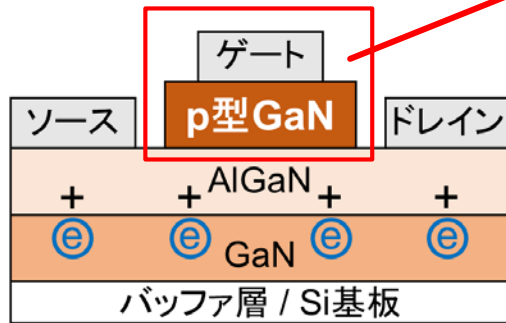


# p型GaNゲートAlGaN/GaN HEMT

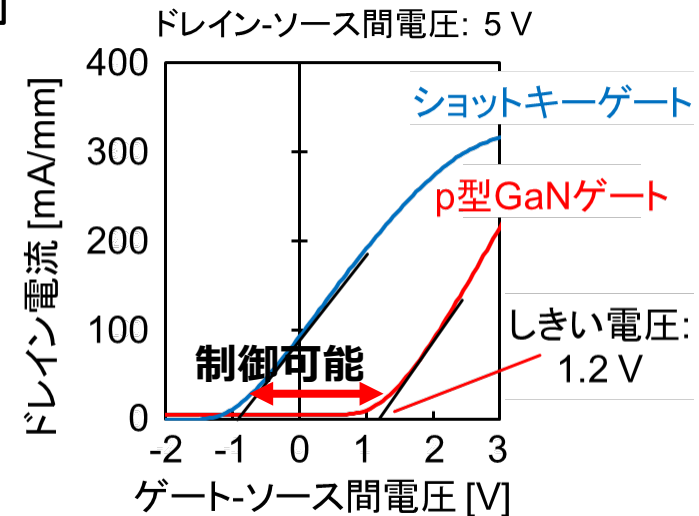
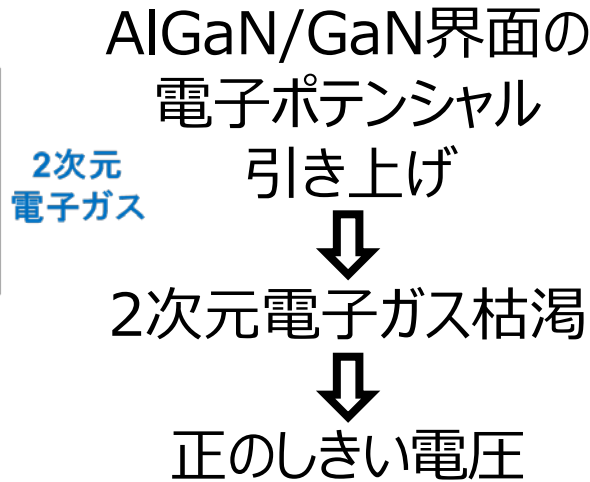
## AlGaN/GaN HEMT

- ・ 2次元電子ガス（分極によりヘテロ界面に発生）を利用  
→ 高い電子移動度 → 低オン抵抗特性
- ・ 一般的に、負のしきい電圧 → システムのフェイルセーフの観点で課題

### p型GaNゲート構造



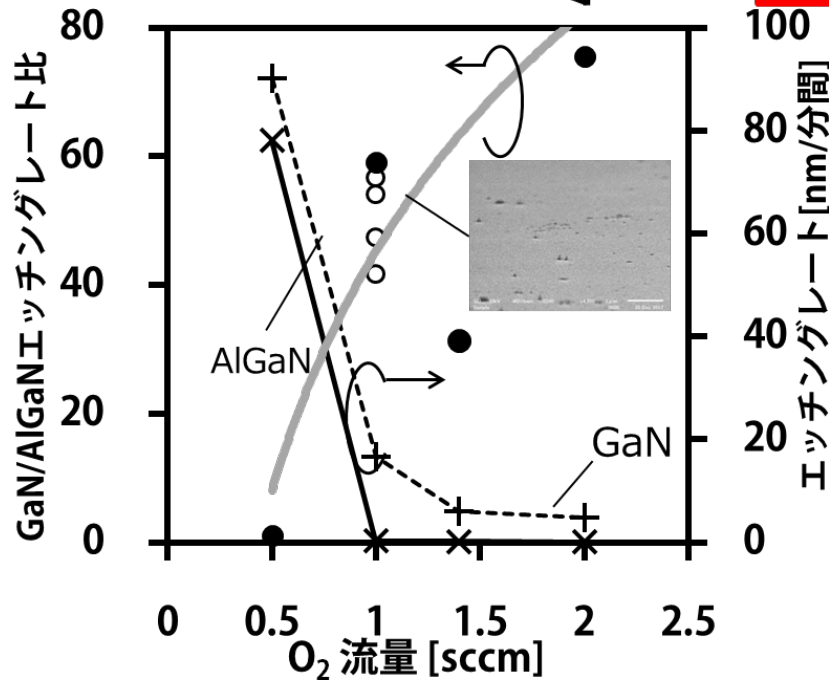
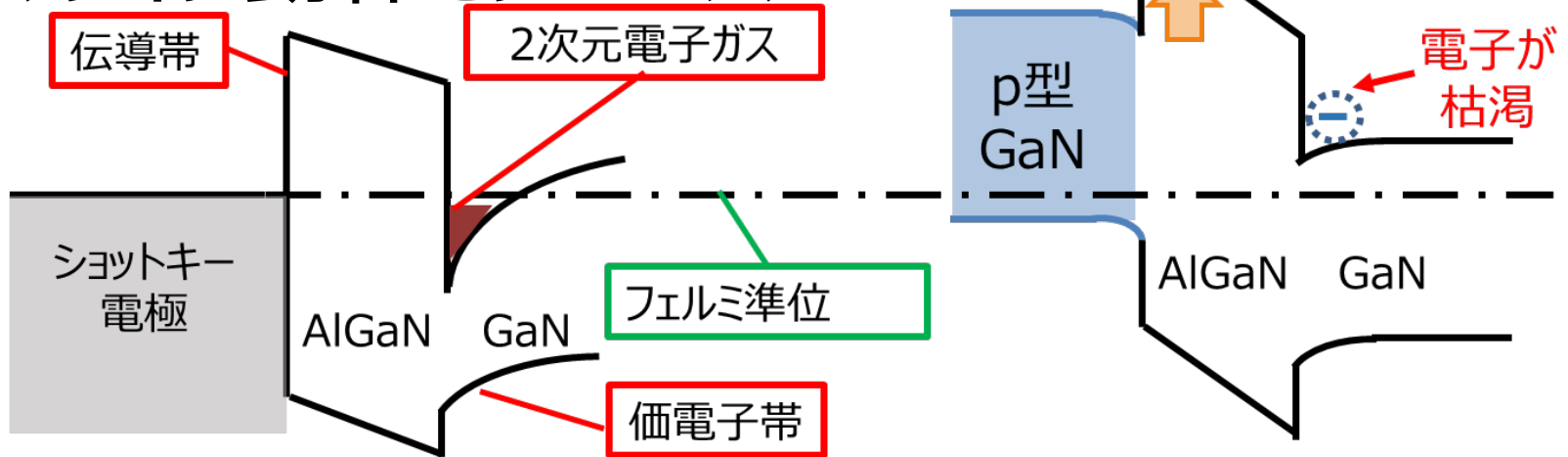
p型GaNゲートを有する  
AlGaN/GaN HEMT



p型GaNゲートHEMTは、低オン抵抗で正のしきい電圧

# p型GaNゲートによる ノーマリオフ動作とプロセス

ゲート下のエネルギーバンド構造  
(左:ショットキーゲート, 右:p型GaNゲート)



Cl<sub>2</sub>/ArガスにO<sub>2</sub>を添加した  
誘導結合型反応性イオンエッチング

ガス Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/Ar : 20/1/5 [sccm]  
電力 ICP/Bias : 120/7 [W]  
マスク材 SiO<sub>2</sub>

エッチングレート  
AlGaN/GaN : 0.3/16 [nm/分間]

**選択比AlGaN:GaN = 1 : 50**  
かつ**良好な表面状態**を獲得

# ゲートドアノードダイオード

正のしきい電圧を示すp型GaNゲートAlGaN/GaN HEMT

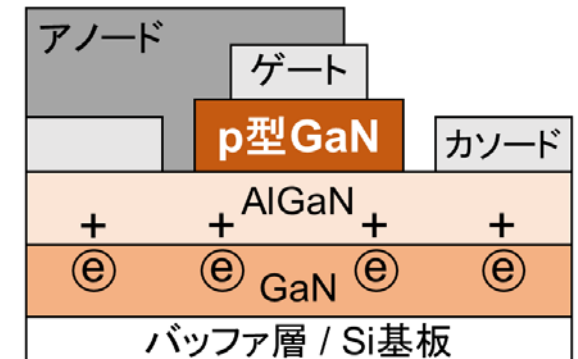


**展開** オン電圧の制御が可能なゲートドアノードダイオード

構造： HEMTのゲートとチャネルの一方を接続してアノード電極

特徴：

- ・ **低オン抵抗** ← 2次元電子ガスを利用
  - ・ **低オン電圧** ← HEMTのしきい電圧を反映
- 微弱な電波の高効率整流に好適



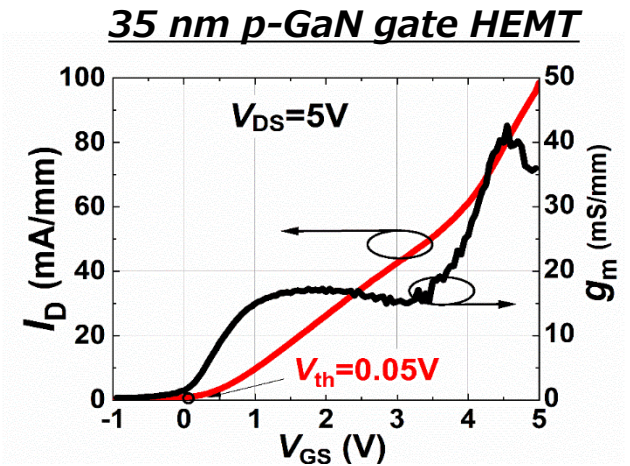
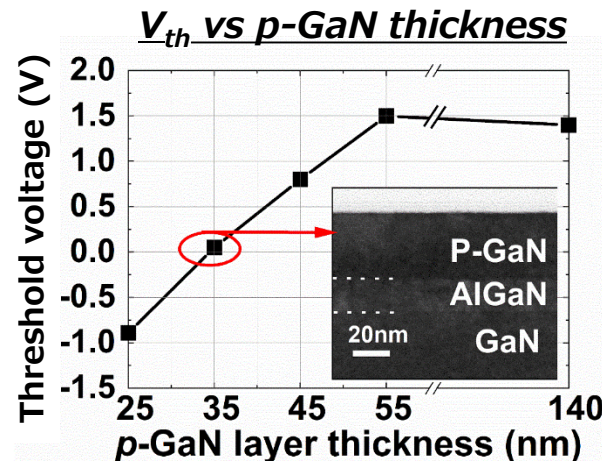
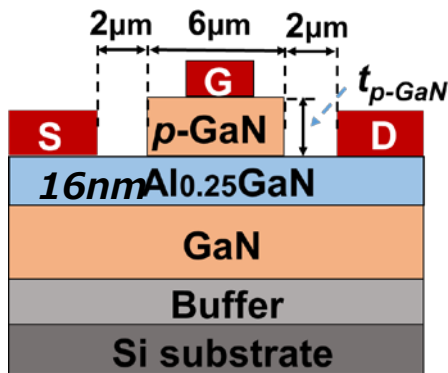
ゲートドアノードダイオード構造

**検討** p型GaNゲートの構造を変えて、特性を制御

# Low turn-on voltage rectifier using p-GaN gate AlGaN/GaN high electron mobility transistor for **energy harvesting applications**

Y. Zhang, S. Kawata, and N. Iwata, Jpn. J. of Appl. Phys. **61**, SA1013 (2022).

p-GaN gate HEMT      p-GaN thickness variation & performances

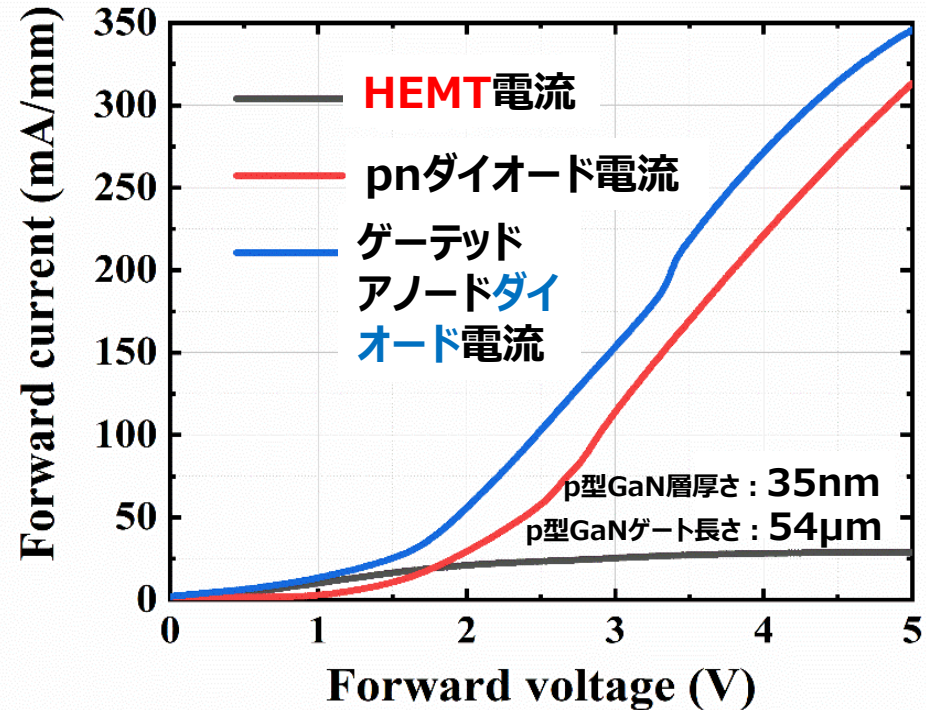
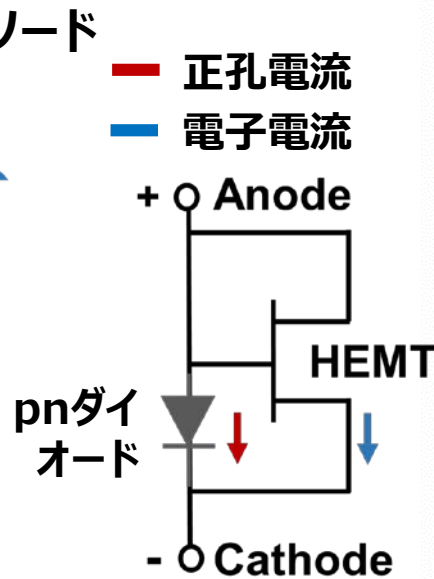
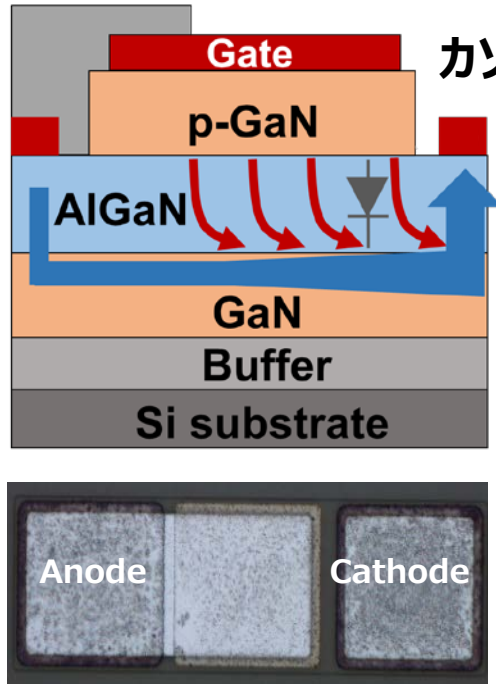


- Low threshold voltage ( $V_{th}$ ) with **reduced p-GaN thickness**
- $V_{th}$  of **0.05 V** is obtained with 35 nm p-GaN
- **Hole-injection** enhances on-state current

**p-GaN gate HEMT** is **suitable for rectification applications**

# ゲートッドアノードダイオードの構造と特性

アノード

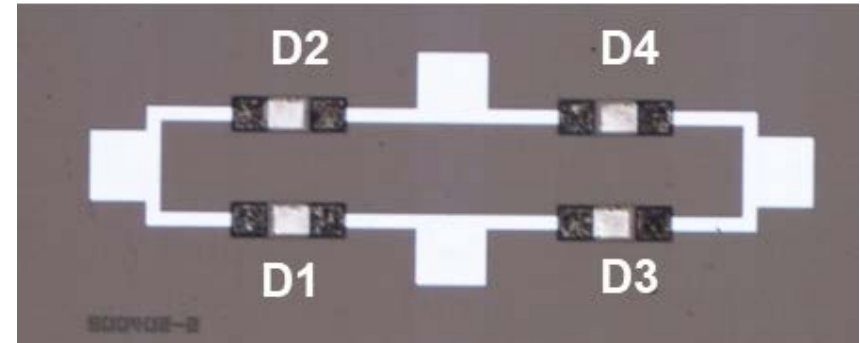
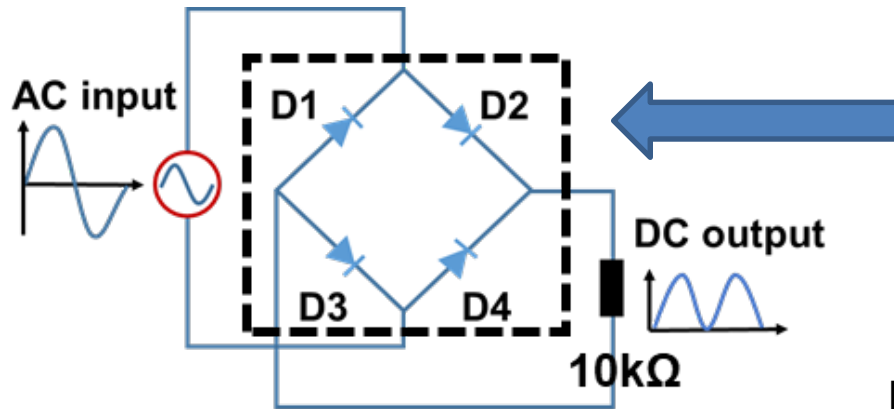


- 最初にHEMTがON！ ( $V_{th}$ はp-GaN層の厚さで制御)
- 次にゲートpnダイオードがONして、電流が増加

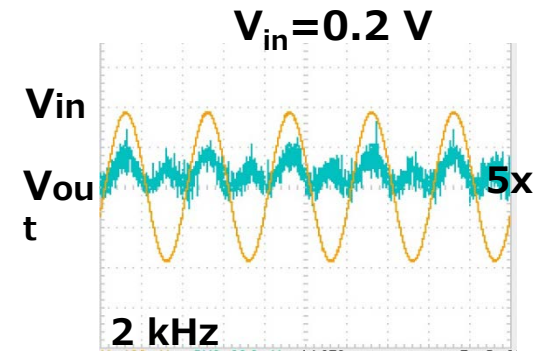
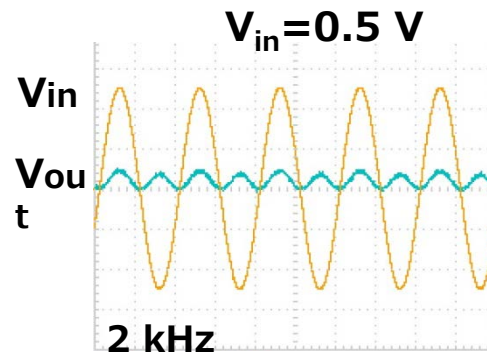
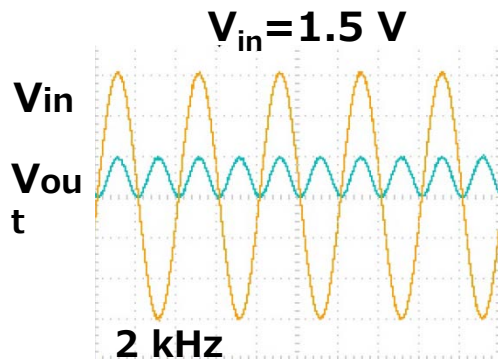
$$I_{\text{ゲートッドアノードダイオード}} = I_{\text{HEMT}} + I_{\text{pnダイオード}}$$



# Full-wave rectification using gated anode diode bridge IC



p型GaN層厚さ : 35nm p型GaNゲート長さ : 54 $\mu$ m

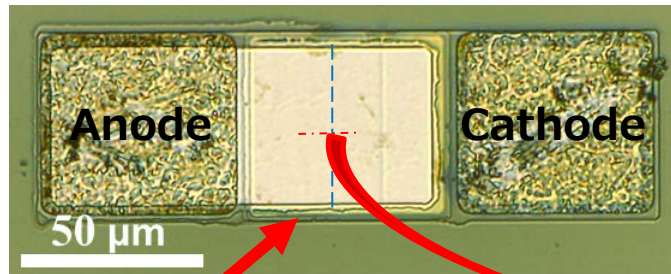


- Full-wave rectification was achieved with p-GaN gated diode bridge IC
- Undistorted full-wave rectification was observed with  $V_{in}$  down to 0.2V

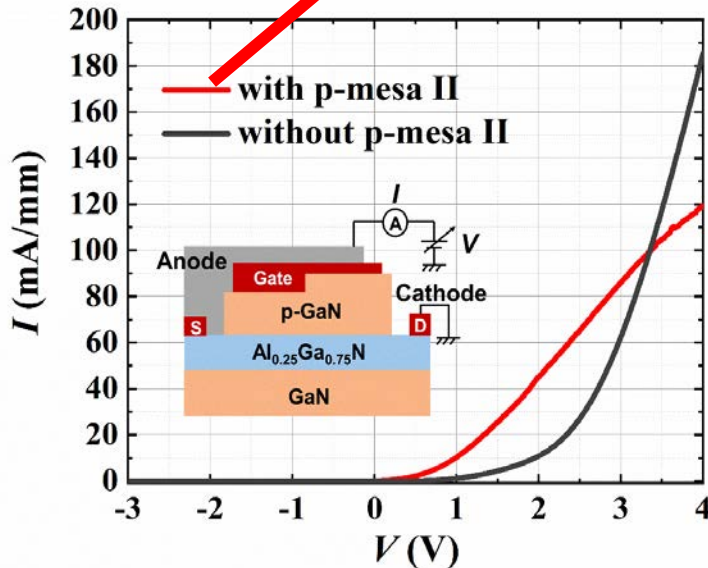
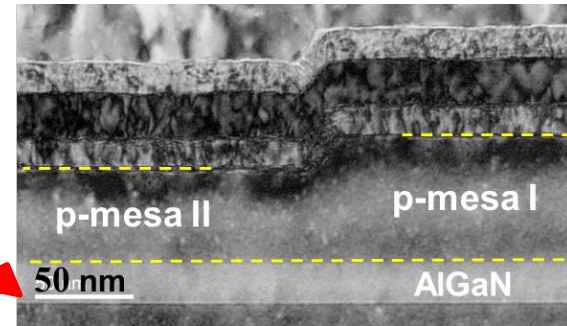
# Two-step mesa p-GaN gated anode diode

Y. Zhang and N. Iwata, SSDM2021, on line, D-7-03.

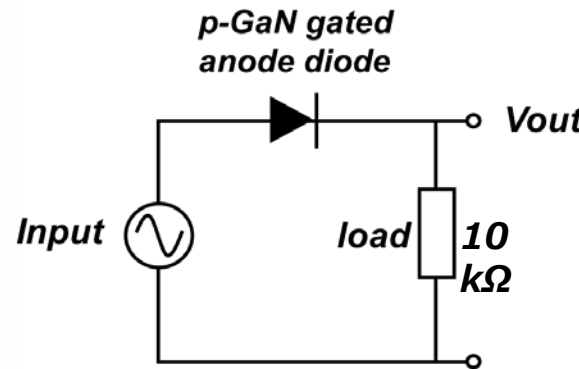
Gated anode diode



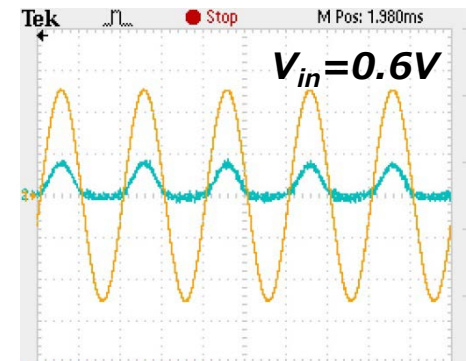
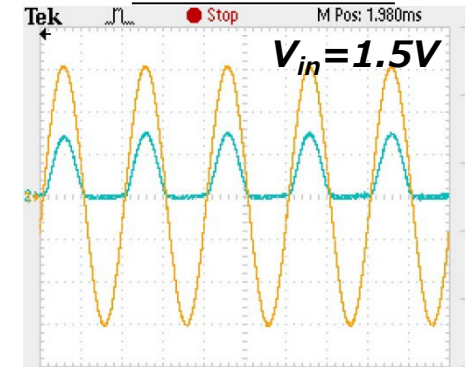
TEM image of p-GaN mesa



Testing circuit



Rectification



- Low  $V_{on}$  of 0.58 V and high current of 90 mA/mm @3V achieved simultaneously
- Half-wave rectification achieved without signal distortion at 2 kHz frequency

追加する構造

# GaN/AlGaN/GaNスーパー接合と課題

スーパー接合(SJ)構造：電子と正孔チャネルの対を有する空間電荷の平衡で、均一な電界 → 高耐圧特性  
Siで実用化 → 一層の高耐圧化に向けGaNに注目

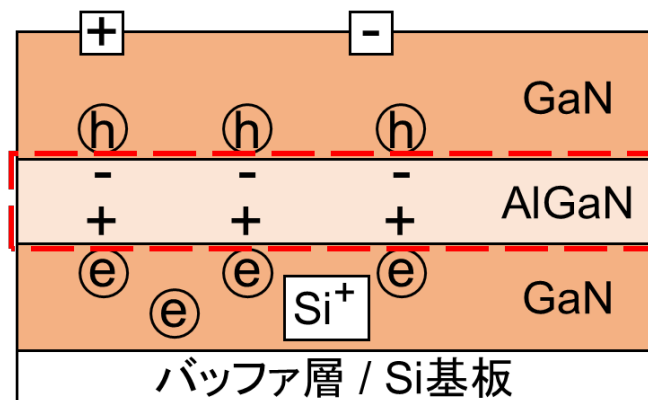
GaN/AlGaN/GaNヘテロ構造：

同濃度の正負の電荷（分極により上下のヘテロ界面に発生）

課題

意図せず発生する空間電荷の不釣り合い

同濃度の電荷



- ・残留Siドナー（結晶成長時に混入）
- ・表面準位の電荷

→ 電荷の補償による空間電荷の釣り合わせが必要

対応

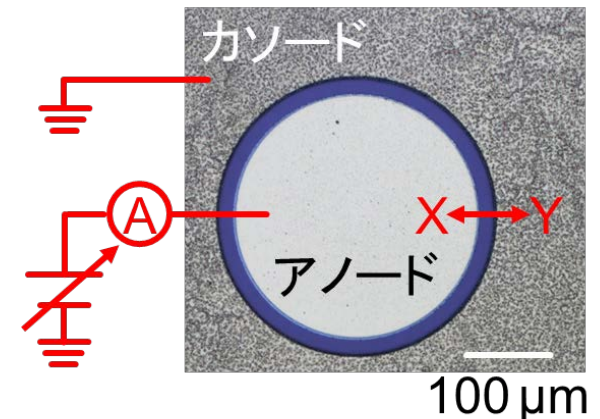
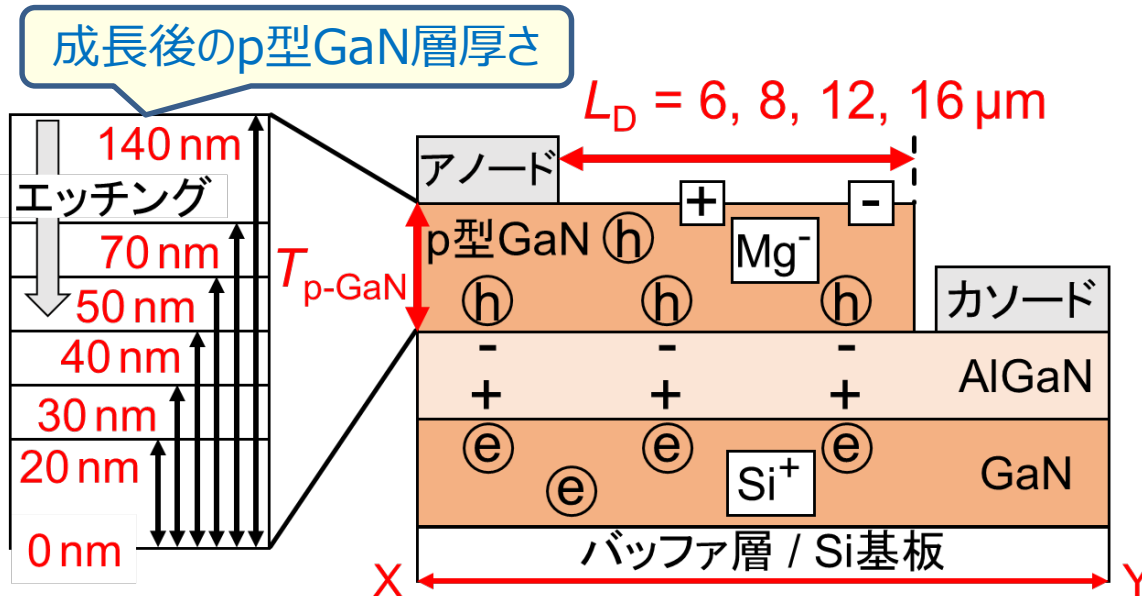
p型GaN層を適用してアクセプタで残留Siドナーを補償

# Breakdown voltage enhancement of p-GaN/AlGaN/GaN diode by controlling Mg acceptors for compensating residual Si donors

S. Kawata, S. Fukutani, Y. Zhang, and N. Iwata, Jpn. J. of Appl. Phys. in press (2022).

## 検討 様々なp型GaN層の厚さとドリフト領域長を有するダイオード

1. p型GaN層の厚さ ( $T_{p\text{-GaN}}$ ) を制御
2. ドリフト領域 (長さ:  $L_D$ ) を形成 (p型GaN領域の形成)

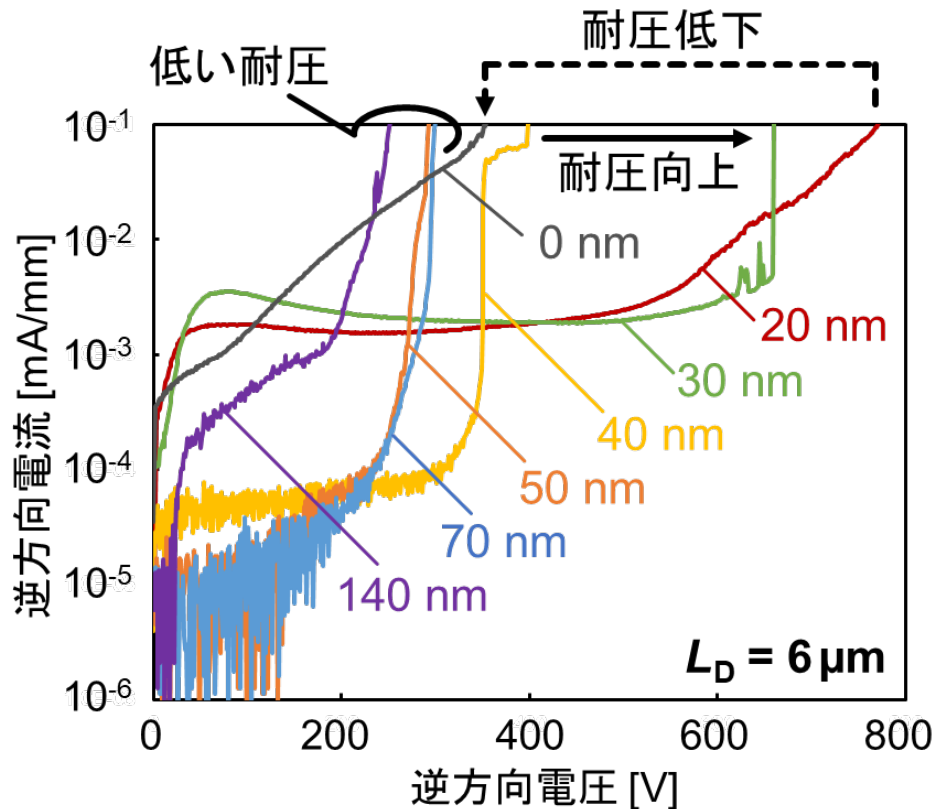


スーパー接合ダイオードの外観と測定回路図

# 耐圧特性のp型GaN層厚さ依存性

耐圧※とp型GaN層の厚さ( $T_{p-GaN}$ )の関係を検討 (ドリフト領域長:  $6 \mu\text{m}$ )

※ 耐圧: 逆方向電流:  $0.1 \text{ mA/mm}$ で定義



$T_{p-GaN}$  50 nm以上:  
300 V程度の低い耐圧

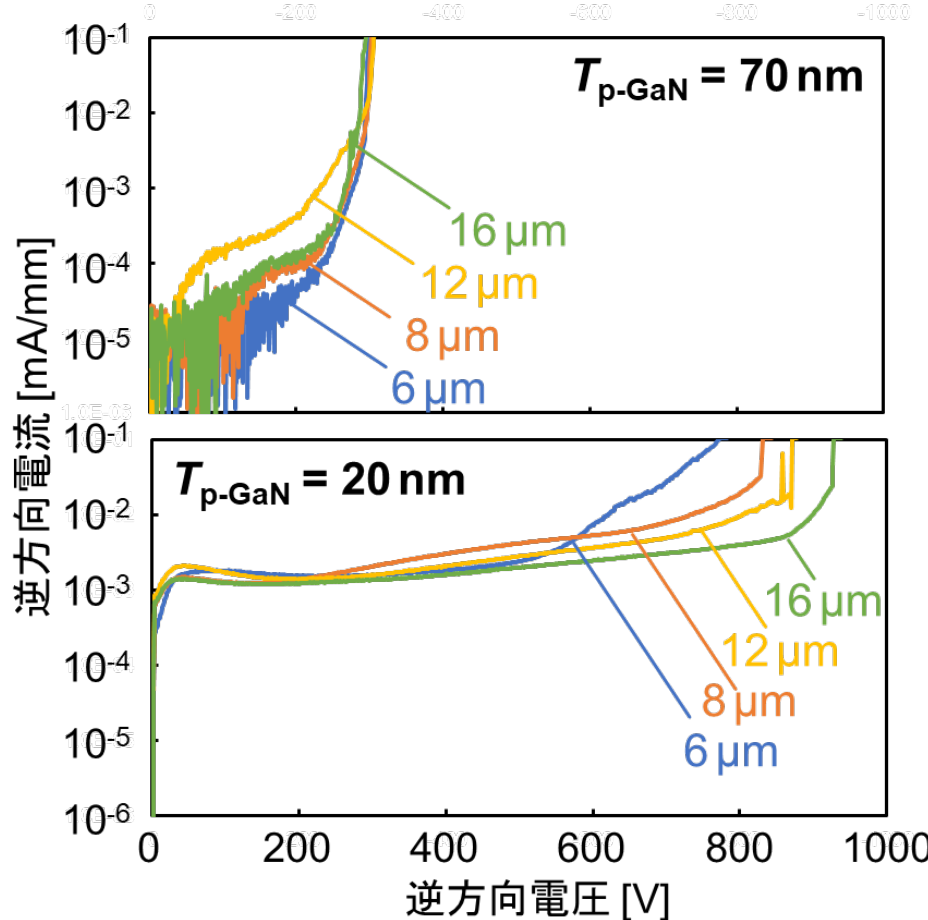
$T_{p-GaN}$  40 nm以下:  
・ 薄層化に伴い、耐圧向上  
→ 20 nmで**最大化**  
・ 0 nmで低下

アクセプタ濃度は $T_{p-GaN}$ に比例  
→ 空間電荷のつり合いが  
変化

$T_{p-GaN}$  20 nmで耐圧が最大化 ← 空間電荷のつり合いを示唆

# 耐压特性のドリフト領域長依存性

ドリフト領域長を変えて、**耐压特性**を詳細に比較 ( $T_{p\text{-GaN}} = 70, 20 \text{ nm}$ )



$L_D$ に依らない低い耐压

← 空間電荷のつり合いによる  
電界集中の発生

**アクセプタが過剰**に存在

$L_D$ の増加に伴って耐压向上

← 空間電荷のつり合いによる

**均一な高電界** (1.3 MV/cm)

**アクセプタが残留Siドナーを補償**

$T_{p\text{-GaN}} = 20 \text{ nm}$ で空間電荷がつり合い → **高耐压特性** (1.3 MV/cm)

# まとめと課題

環境発電向けのGaNヘテロ構造を用いた  
高効率整流用ダイオードの実現

## p型GaNゲートHEMT

しきい電圧：0Vを実現 ← p型層の構造で制御可能

## ゲートドアノードダイオード

HEMT電流にpnダイオード電流を追加

←ゲート構造の検討(0Vオン電圧と直線的な高電流特性(課題))

## スーパー接合構造の適用(課題)

高耐圧特性の実現 ← 空間電荷の完全な平衡化