



戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期 IoE社会のエネルギーシステム

テーマB-② 「エネルギー伝送システムへの応用を 見据えた基盤技術」

名古屋大学 未来材料・システム研究所
天野 浩

個別テーマ 1

「ワイヤレス電力伝送高速スイッチングデバイスの開発」

背景・目的

個別テーマ1 「ワイヤレス電力伝送高速スイッチングデバイスの開発」

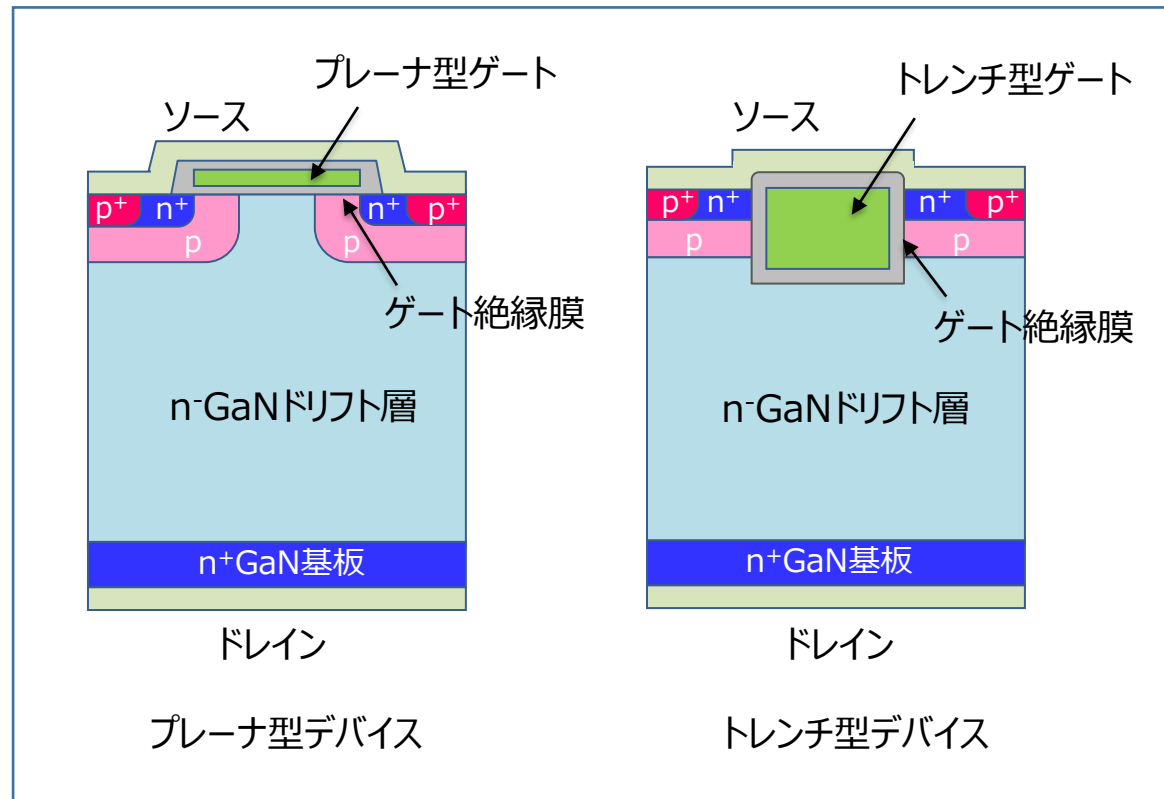
内容：

MHz帯高速スイッチングによる非放射型ワイヤレス電力伝送システムのデバイス技術として、オン抵抗とゲート容量をバランスさせた、無線電力伝送システムに適した縦型GaNスイッチングデバイスの研究開発

特徴：

縦型GaNデバイス、耐圧600V/アンペアクラス、ゲート容量1/2（対SiC）

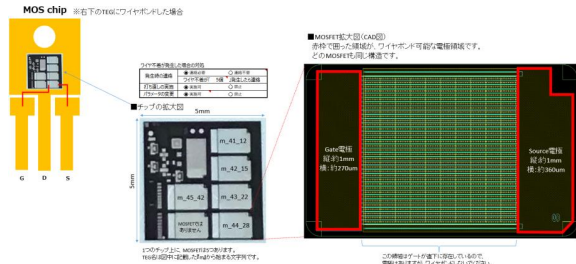
- プレーナ型デバイス
→プロセス歩留まり向上
→製造コスト低減に利点
MOSゲート
耐圧600V/1A以上
- トレンチ型デバイス
→高性能化
MOSゲート
耐圧600V/5Aクラス



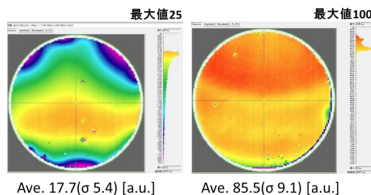
SIPで得られた主要な成果まとめ

トレンチ型縦型GaN

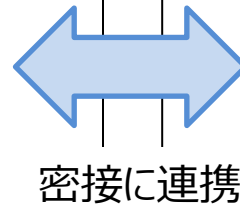
- ・縦型GaNパワーデバイスエピ技術の確立
- ・アンペア級縦型トレンチMOSFETの開発成功



縦型トレンチMOSFET実現のための課題の原因解明と対策を検討、アンペア級の低オン抵抗素子を作製



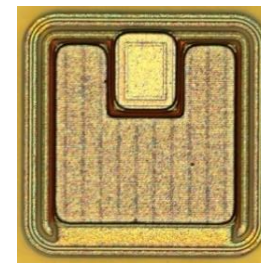
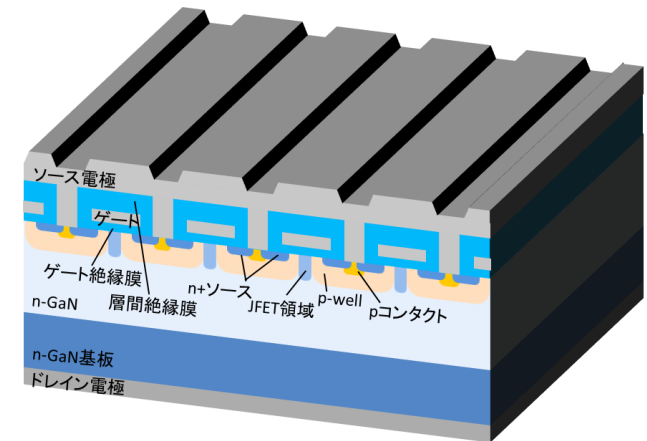
社会実装時に必要となる膜均一性を実現する6インチ（～8インチ）対応縦型GaNエピ装置を確立



密接に連携

プレーナゲート型縦型GaN

- ・イオン注入プロセスを用いたプレーナゲート型縦型MOSFETを開発
- ・1mm²チップで>1Aオン動作達成



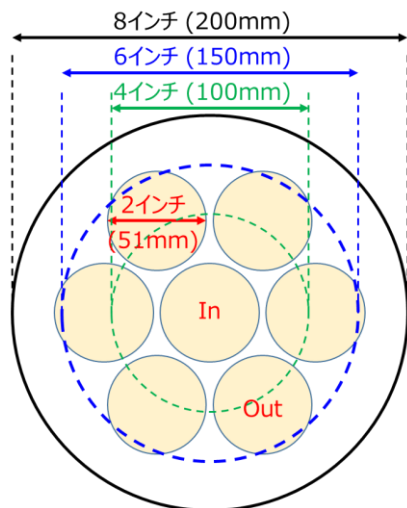
1mm² (> 1A動作)

プレーナゲート型縦型GaN MOSFETでSiCよりも優れたデバイス性能の実現可能性を確認

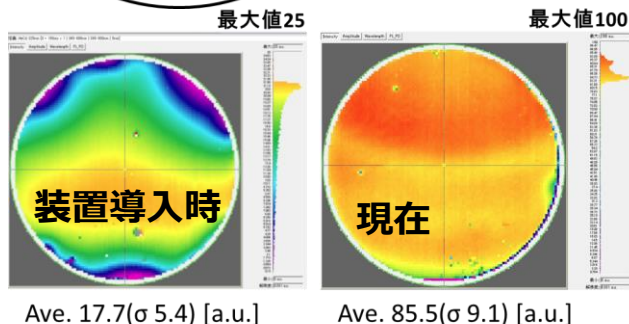
縦型GaNパワーデバイスエピ技術の確立

縦型GaNEピの専用装置は存在しない

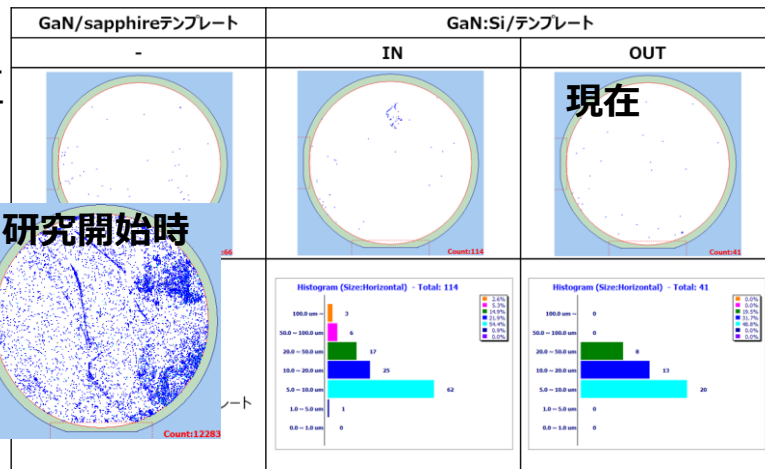
既存GaN/Siエピ装置に改造を加えた装置を新規導入し
条件やノウハウを積み重ねて縦型GaNEピ装置を確立



研究開発用の2インチ7枚
最終的な縦型GaNデバイス生産時の
6～8インチに対応可能な装置



大電流化に必須の
マクロ欠陥低減確立
2インチで10個以下
想定歩留まり
10A級(10mm²)
>90%



名古屋大学エネルギー変換エレクトロニクス
実験施設(C-TEFs)設置の新型エピ装置

装置導入直後と現在の不純物密度の均一性向上

最大直径8インチGaN基板に対応可能なエピタキシャル成長技術を確立

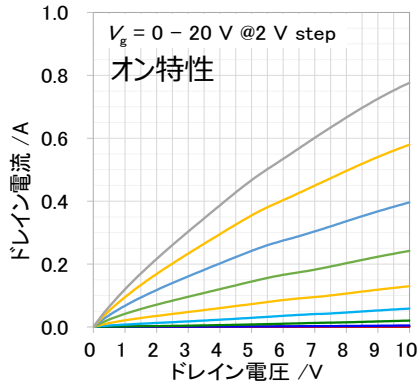
- ・ 不純物密度制御（均一性）
- ・ マクロ欠陥大幅低減

SIPで得られた主要な成果②

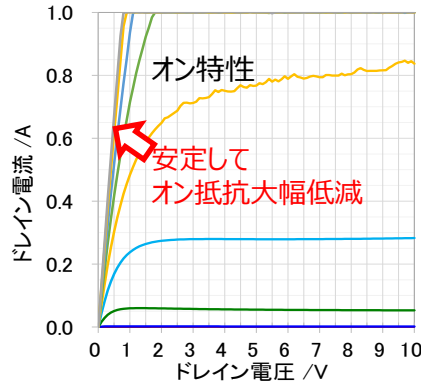
トレンチ型縦型GaN

- ✓ 過去のSIP(縦型GaN基盤技術)、文科次世代半導体で開発した要素技術を統合して縦型トレンチMOSFETを作製を実施。統合で出てきたさまざまな課題の原因説明、対策。
- ✓ オン抵抗 $<0.5\Omega$ (5A級見込み)素子の作製に成功。
- ✓ 広範囲なデバイス構造でのシミュレーションを行い、UMOSFET,DMOSFETの選択のガイドライン提示。

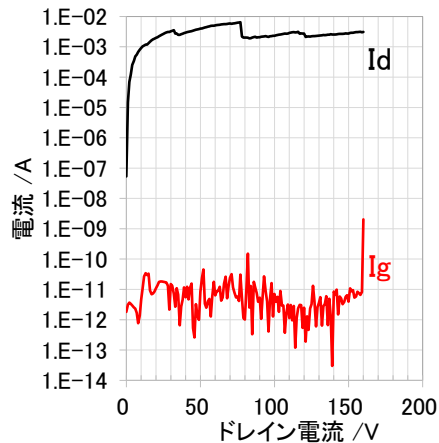
前回試作



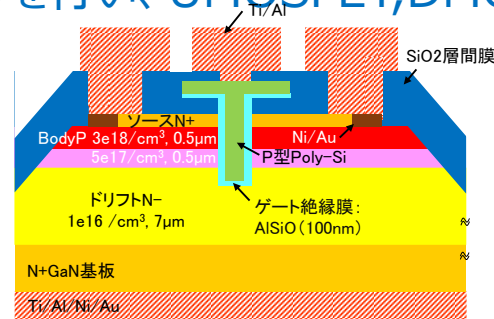
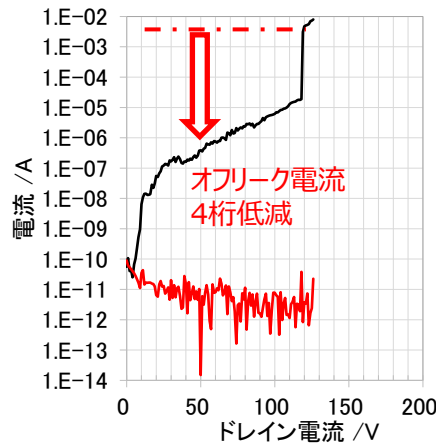
今回試作



前回試作

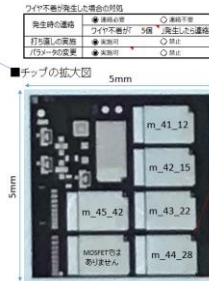


今回試作

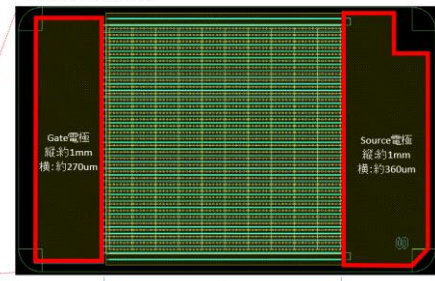


○オン抵抗を大幅低減、安定して $<0.5\Omega$ 実現
○昨年問題だったオフリークの原因を特定し4桁低減
×トレンチ掘り込み過多で耐圧が150Vに低下
→最終試作で改善し600Vを達成予定

MOS chip ※右下のTEGIにワイヤボンダした場合



■MOSFET拡大図(CAD図)
赤枠で囲った領域が、ワイヤボンダ可能な電極領域です。
どのMOSFETも同じ構造です。



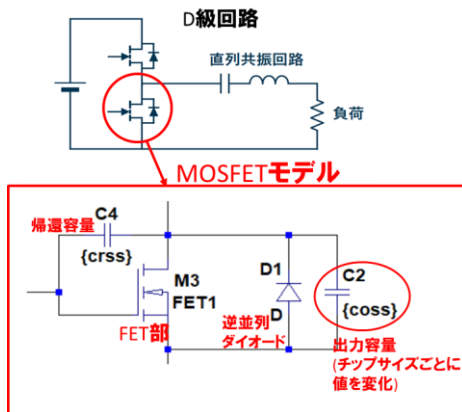
この構造はゲートが直下に存在しているので、電圧はありますが、ワイヤボンダしないのでよい。

オンウェハでの簡易検査完了
大電流/スイッチング評価に向けてパッケージング中

SIPで得られた主要な成果③-1

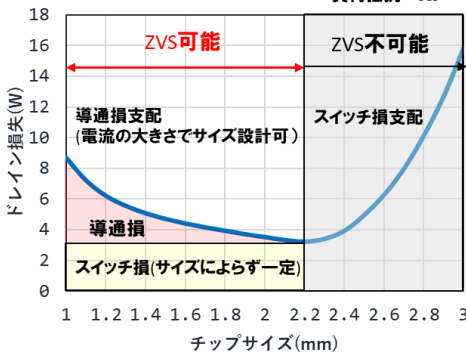
プレーナゲート型

- ✓ 耐圧、低RonA、低Cissを両立するプレーナゲート型縦型MOSFETを設計完。
- ✓ 高周波インバータ回路であるD級共振回路で設計値に基づくシミュレーションを実施。ゼロ電圧スイッチング(ZVS)動作を実現し損失を抑えられるチップサイズ設計範囲を決定。
- ✓ 設計した微細活性領域の構造をイオン注入プロセスで実現。簡易構造の素子で耐圧600Vと低RonA ($<1\text{m}\Omega\text{cm}^2$)を両立できることを示し、プレーナゲート型縦型GaN MOSFETでSiCよりも優れたデバイス性能の実現可能性を示した。



チップサイズと損失の関係

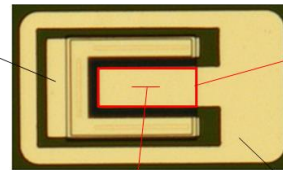
周波数 = 13.56MHz
電源電圧 = 300V
負荷抵抗 = 5Ω



簡易構造の縦型MOSFET

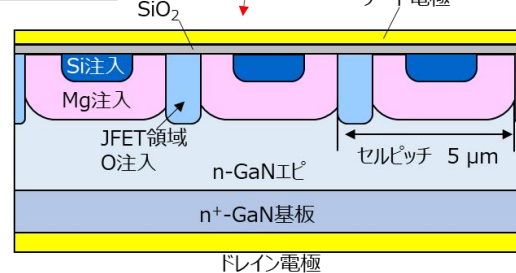
簡易素子写真

ソース電極

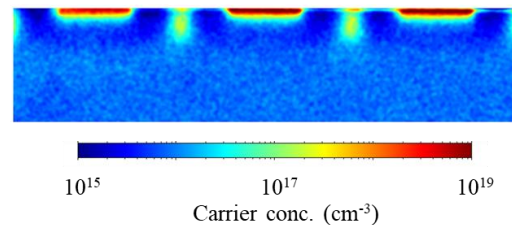


活性領域

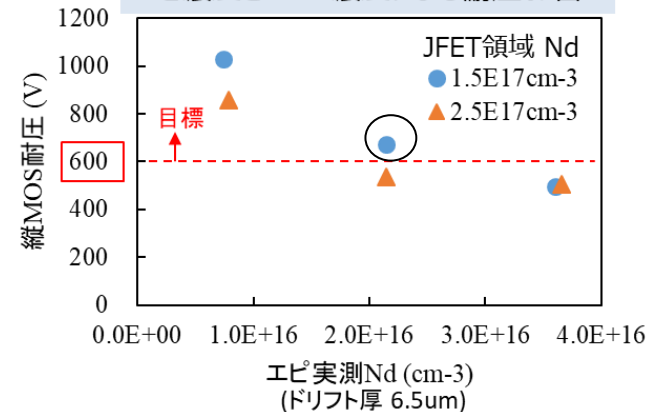
断面イメージ



断面キャリア濃度プロファイル (n型濃度)

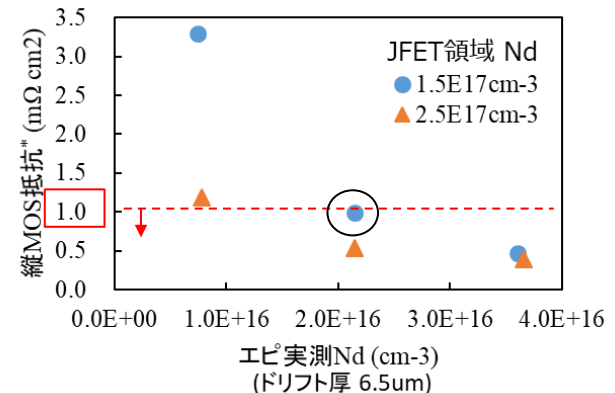


エピ濃度とJFET濃度による耐圧影響



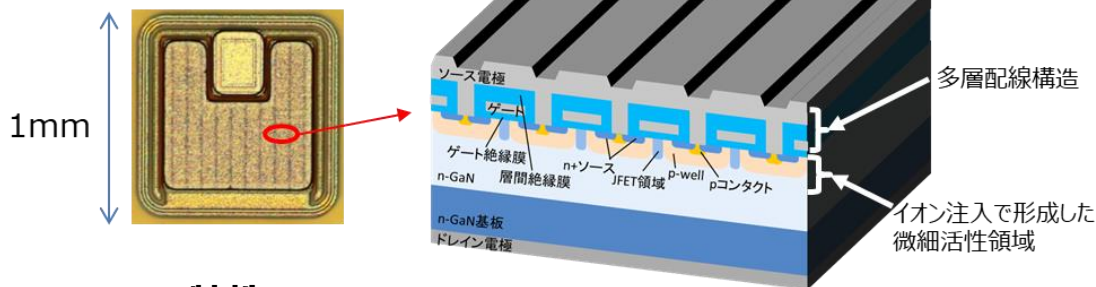
エピ濃度とJFET濃度によるオン抵抗影響

* 活性領域のみのオン抵抗換算値

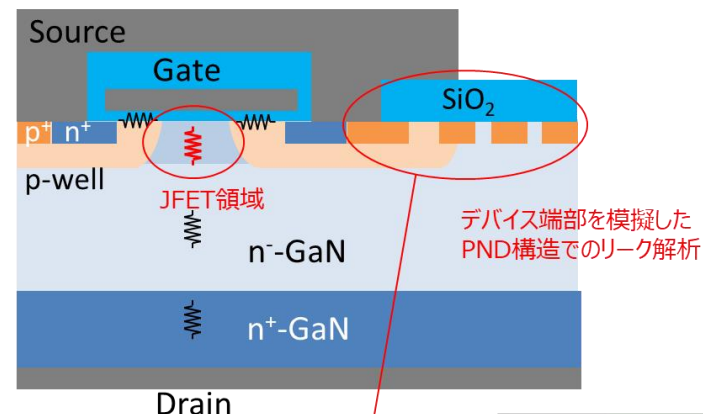


- ✓ イオン注入で形成した微細活性領域を大面積化し1mm□チップのプレーナゲート型縦型MOSFETで1A動作達成。ゲート容量も設計通りに得られることも確認。
- ✓ オン抵抗、耐圧の課題抽出完了。JFET抵抗の調整と主接合、終端部でのリーク対策を改善試作で継続実施中。

縦型MOSFETチップ

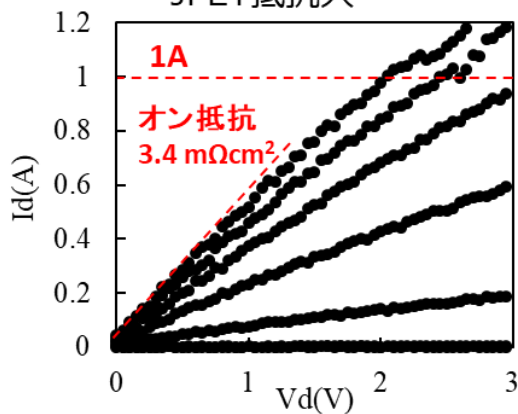


MOSFET断面模式図

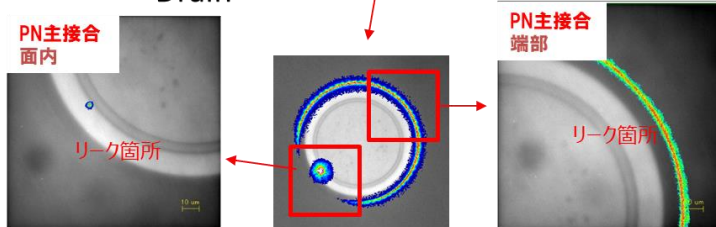
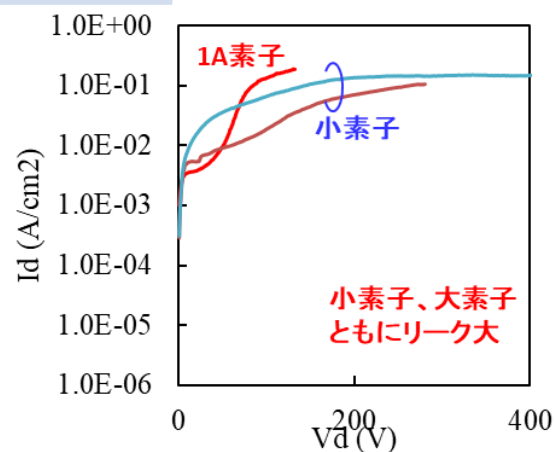


MOSFET特性

出力特性 ◎ 1A達成
JFET抵抗大



耐圧特性 初期リークを確認



リークモニタ素子のエミッション顕微鏡像

社会実装の実現可能性

2025年までの出口戦略

- 高速スイッチング縦型パワーデバイスを作製し、回路動作も含めてデモンストレーションを行う。これによりMHz大容量無線電力伝送への関心喚起、他用途での高速スイッチングデバイスの潜在的需要を掘り起こす。
- SIP後は本格的な大電流化・高耐圧化の作り込み、低コスト化技術開発プロジェクトをNEDOプロなどで立ち上げ、強力に推進する。
- WPT以外の用途にも積極的に展開、ニッチなニーズにデバイスを提供してユーザーからのフィードバックを得て改善を進める。

2022年度末での社会実装の達成見込み

- 世界有数のパワーデバイスメーカーである富士電機が参画し成果を積み上げている。学術的視点が必要なプロジェクトについては富士電機と名古屋大学が共同で取り組んでいる。企業への技術移転はスムーズに進められる。

社会実装に向けた体制構築の状況

- 世界唯一と言えるGaN縦型パワーデバイス研究開発プラットフォームが名古屋大学に構築されている。本課題で得られた知見や技術も合わせて提供することで国プロ成果を有効活用した産学連携、あるいは企業の独自研究が可能。
- 縦型GaN-MOSFETの社会実装責任者を富士電機株式会社から選定し、社会実装に向けたシナリオと研究開発体制の明確化を進めている。

成果の対外的発信

取り組み方針

- GaN縦型パワーデバイスの高速スイッチング性に特化した研究開発は皆無であり、先駆けである。無線電力伝送の研究拠点を強化している他国を念頭に、戦略性をもって対外発信の可否を判断。
- SIP後の展開、出口戦略を考え、本テーマで確立したエピ装置の共同利用拠点、デバイス試作結果などを発表し、積極的に成果をアピールし、次の段階の産学連携研究への展開する。また他のGaN関連技術開発への活用、連携を行う。

主要な実績

英文論文3件、国際学会 2 件、国内学会 3 件

英文論文発表

1. Shohei Rokuno and Jun Suda, "Design guidelines suppressing dynamic punch-through in GaN vertical MOSFETs by considering the Poole-Frenkel effect", Applied Physics Express, Vol. 14, 024001 (2021).
2. Takashi Ishida, Keisuke Sakao, Tetsu Kachi and Jun Suda, "Impact of Cell Pitch on High-speed Switching Performance in GaN Vertical Trench MOSFETs", Applied Physics Express, Vol. 14, 094002 (2021).
3. Takashi Ishida, Keisuke Sakao, Tetsu Kachi and Jun Suda, "Comparison of switching performance of high-speed GaN vertical MOSFETs with various gate structures based on TCAD simulation", Jpn. J. Applied Physics, Vol. 62, 014001 (2023).

個別テーマ 2

「MHz帯電力伝送システム基盤技術の開発」

背景・目的

個別テーマ2 「MHz帯電力伝送システム基盤技術の開発」

内容：

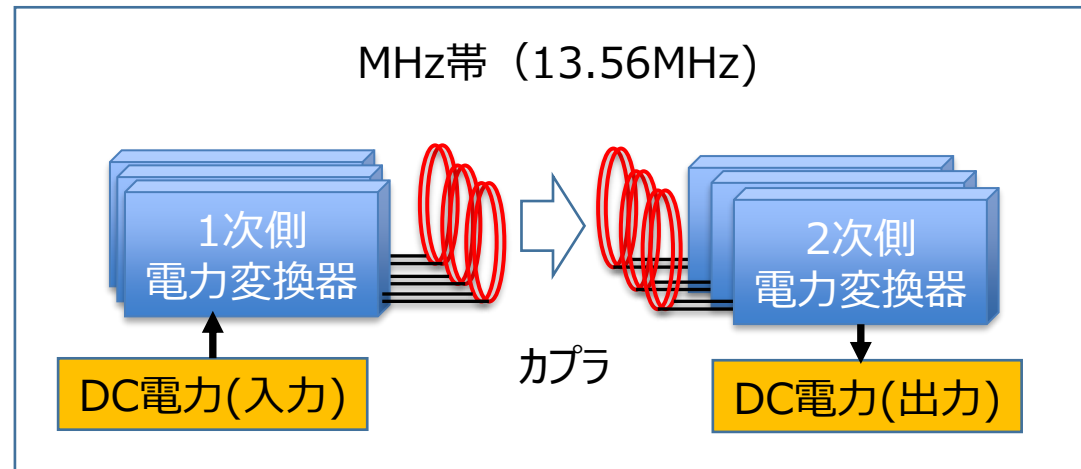
MHz帯高速スイッチングによる非放射型ワイヤレス電力伝送システムの回路技術として、GaNデバイス的高速性を引き出す13.56MHz高速スイッチング回路技術、およびMHz帯ワイヤレス電力伝送システムの大容量化技術の開発

競争力を確立するための特長：

高速スイッチング回路技術

- 多相化（並列化）
 - 大電力化（～7.7kW）
 - 高効率化（95%以上）
 - 放熱性
- 同期整流回路技術
 - 制御性

（MHz帯、kWクラスでの同期）



GaN縦型デバイスの研究開発と並行し、現状入手可能なGaN-HEMTを利用して推進

- 高速スイッチング回路設計の観点から縦型GaNデバイスに求められる性能についてデバイスグループと情報共有
- 本課題終了後、GaN縦型デバイスの成果を高速スイッチング回路に適用し、MHz帯電力伝送システムの社会実装を目指す

SIPで得られた主要な成果まとめ

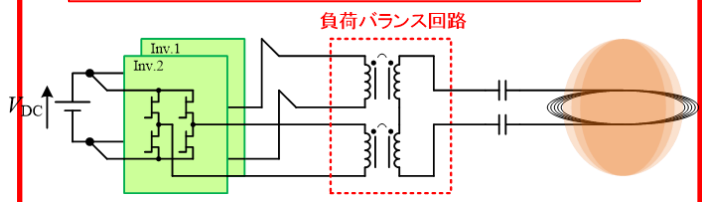
①高速スイッチングインバータ：共通基盤技術



単相L-Sインバータ（新規提案）

中耐圧（～650V）のGaNデバイスの
高速性を引き出しつつ高出力化を
可能とする回路技術

③並列運転技術：大容量化技術



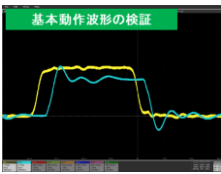
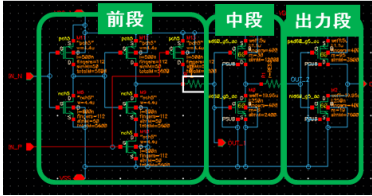
負荷電流バランス回路による並列運転技術

MHz動作インバータ出力大容量化のための
並列運転を可能とする電流分担技術



②ゲート駆動IC：共通基盤技術

ゲート駆動IC内部回路



動作波形

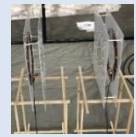
100個以上のIC内部Trを同期させ
1nsレベルの急峻な立ち上がり動作を
実現するIC設計技術



ドローン



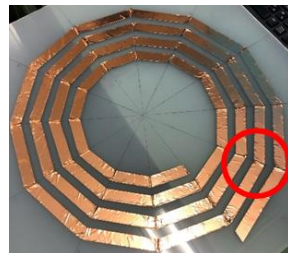
高周波インバータ
(MHz帯スイッチング)



カプラ

MHz帯電力伝送のPOC
(ドローンへの給電)

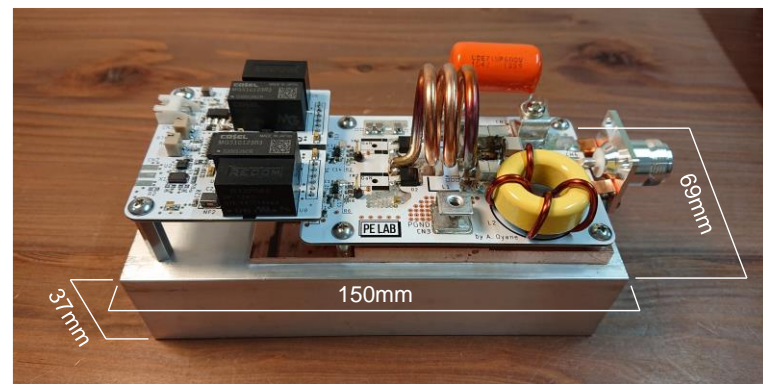
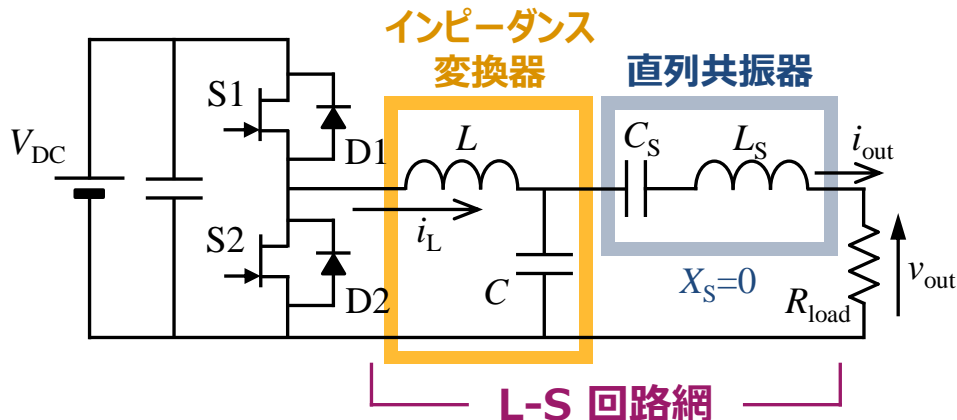
④低損失カプラ：大容量化技術



高効率カプラ

銅箔を用いたカプラ（世界初）により
モバイル機器へのWPT給電において求められる
軽量化に寄与する技術

- ✓ 従来 … GaN-HEMTの耐圧は低い（最高650V程度）
⇒ 単相13.56MHz高周波インバータでは2kW以上の高出力化が困難。
- 原因：MHz用の ϕ 2級、E級回路トポロジーでは、ドレインソース電圧がDC電源電圧の2～4倍まで上昇。
⇒ 電源電圧100～300V程度でも耐圧ギリギリ … GaN故障リスク＝大。
- ✓ 本研究 … 単相の「提案L-Sインバータ」：GaN-HEMTでも安定的に高出力電力を実現。
- ハーフブリッジ回路トポロジーに着目 … ドレインソース電圧が電源電圧にクランプされ、超過しない。
⇒ 電源電圧300Vでドレインソース電圧も300V … GaN故障リスク＝小。



大電流化による**高出力化**

⇒ インピーダンス変換器で対応

誘導性インピーダンスによる**ZVS動作**

⇒ インピーダンス変換器で対応

Q値の確保による**高調波抑制**

⇒ 直列共振器で対応

機能の役割分担による高い設計自由度 … 各要求仕様に対する個別最適化設計が可能。

✓ 受動素子とGaN-HEMTの電圧・電流負担を軽減。

✓ 高周波(13.56MHz)・高効率(96.2%)・高出力(2.8kW)を達成！



大容量DC電源装置
PRT500V66A10kW



インバータ



通過型電力計
Bird 4410A

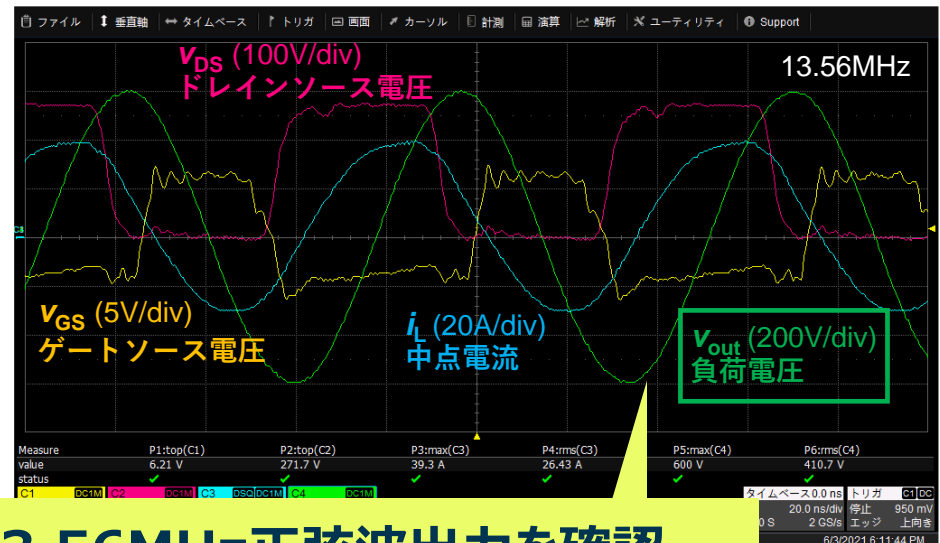
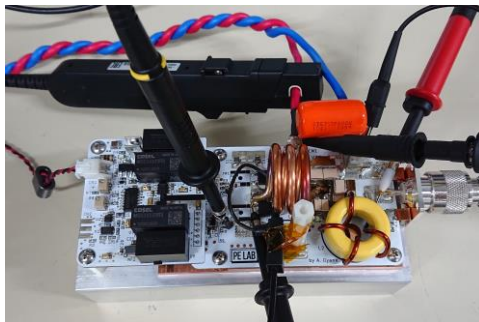
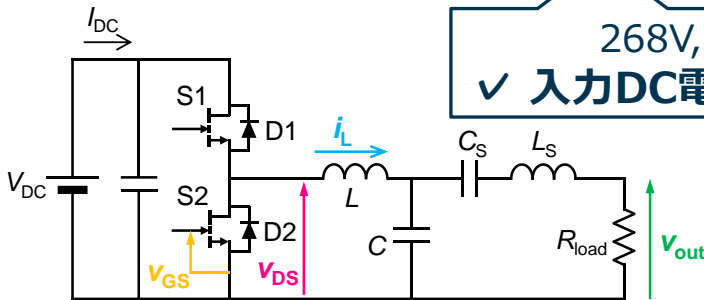
RF
負荷
50Ω



268V, 10.7A
✓ 入力DC電力 2.87kW

✓ 出力RF電力 2.76kW

✓ 効率 96.2%



サージや歪みのない13.56MHz正弦波出力を確認。

出力正弦波における**歪みの少なさ**を定量的に評価。
方法：パワースペクトラムによって**高調波電力**を測定。

50Ω →



インバータ
2.76kW



Bird 8329-300
油冷アッテネータ
30dB減衰

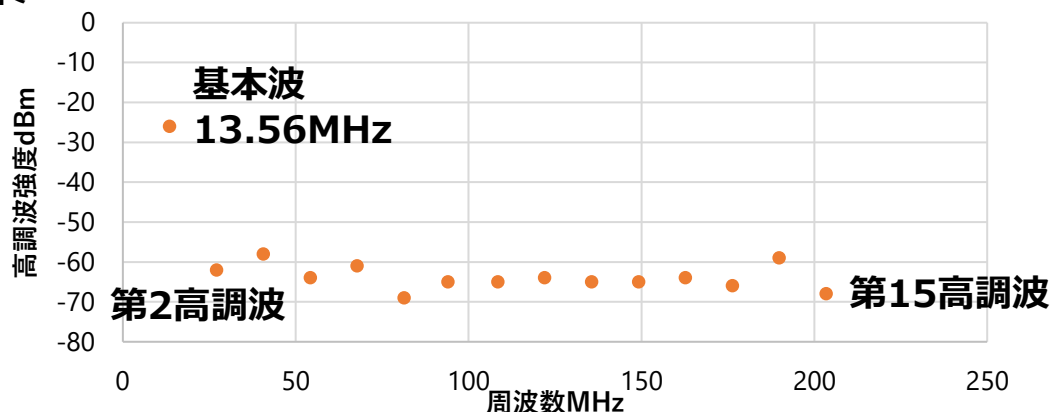


アッテネータ
20dB減衰



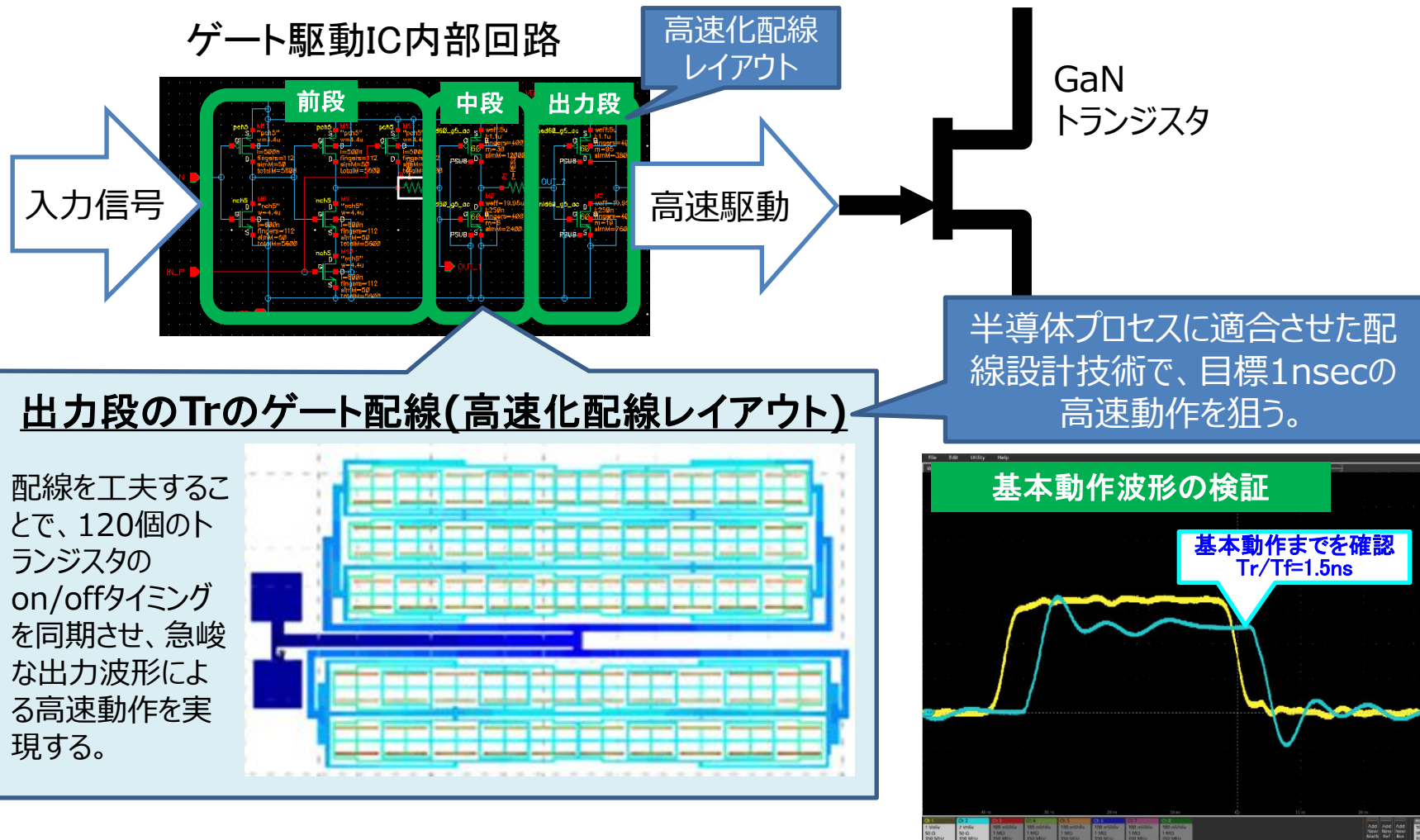
スペクトラムアナライザ
最大許容電力
=30dBm (=1W)

高調波測定結果



高調波が非常に小さい … ワイヤレス給電用途に適する。

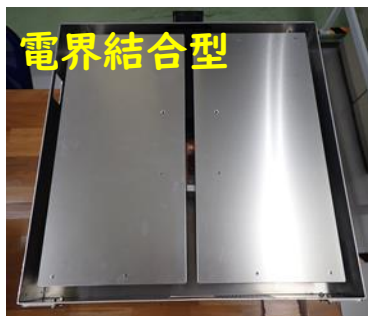
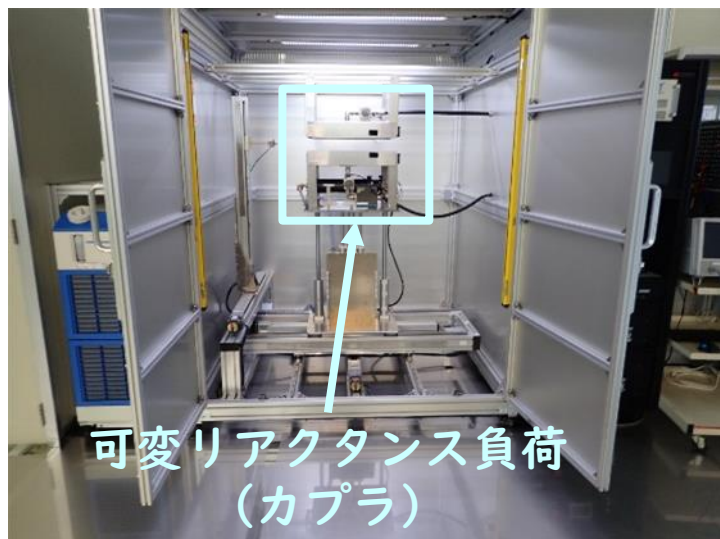
大ゲート容量(1nF)のGaNトランジスタを高速(周波数13.56MHz)かつ低損失(スイッチング時間約1ns)で駆動可能なゲート駆動ICを開発、基本動作を実デバイスで実証。
ゲート駆動ICの出力段を構成する120並列のTrのon/offを完全同期させる高速化配線レイアウトを開発。シャープの低on抵抗半導体プロセスに適合化させて高速動作を実現。



大電力向け「可変リアクタンス負荷装置」の開発

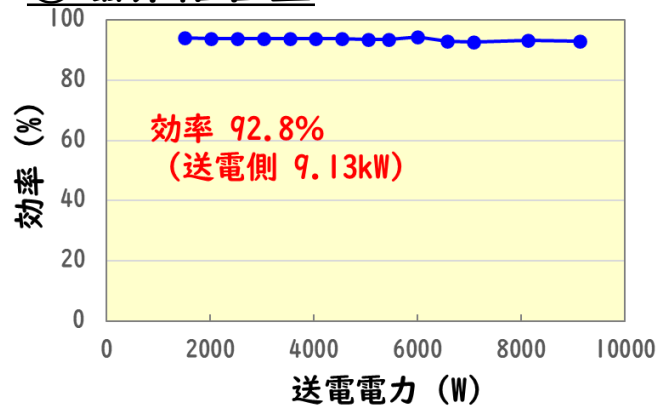
⇒ 電界結合型、磁界結合型カプラを用いた10kW級耐量の負荷装置を開発

▼開発した可変リアクタンス負荷装置



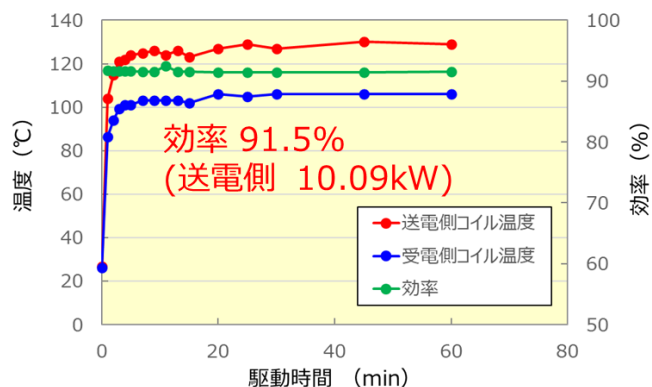
■2種のカプラについて特性評価を実施

①磁界結合型



9kW級の耐量を確認

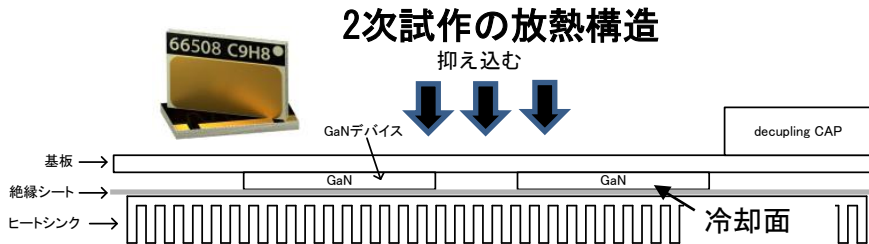
②電界結合型



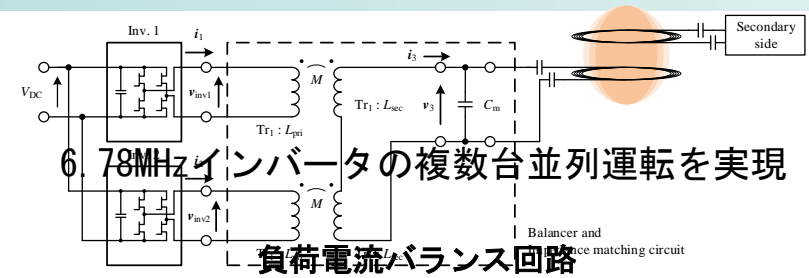
1時間の連続通電にて
10kW級耐量を確認

(1) MHz帯インバータの大電力化技術

GaNデバイス構造に特化した半導体冷却構造を開発

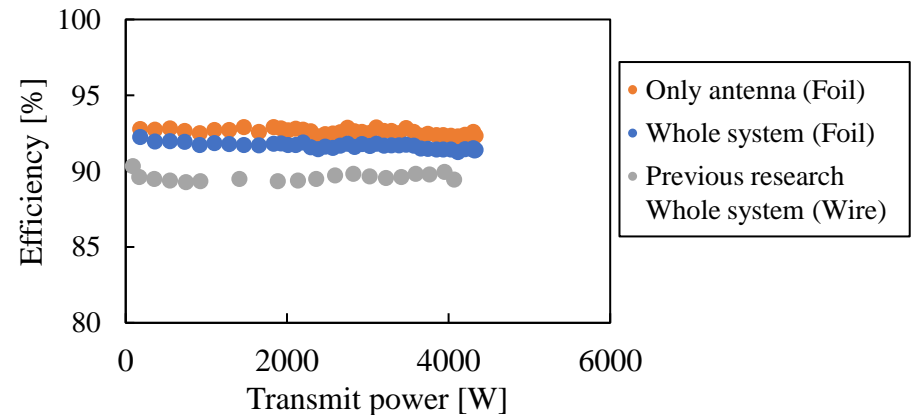
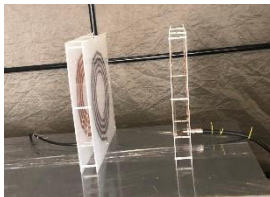
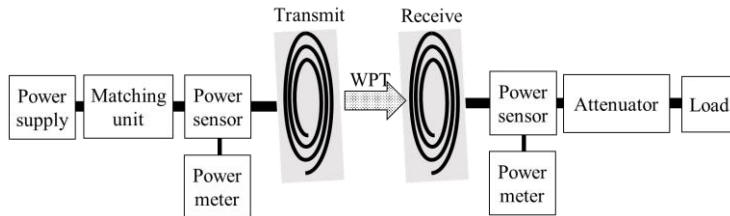


高周波インバータの大電力化に大きく貢献



(2) MHz帯ワイヤレス給電用カプラの大電力化技術

高効率化のため
銅箔を用いたカプラを開発（世界初）



高効率（92.6% @ 4.3kW）ワイヤレス給電を実現

社会実装の実現可能性

2025年までの出口戦略

- 13.56MHz電力変換器、ゲート駆動IC、電源システム、評価システムの実現とその産業機器への応用を進める
- 非放射型ワイヤレス電力伝送システムとしては、電気自動車用大容量ワイヤレス給電システムへの適用を視野に、工場内のAGVでの社会実装を進め、その後EV車両への給電システムに展開

2022年度末での社会実装の達成見込み

- 高周波駆動可能なゲート駆動ICの商用化を視野に、基本仕様の最適検討を推進中。（シャープ）
- インピーダンス計測システムの商用化を模索（古河電工）

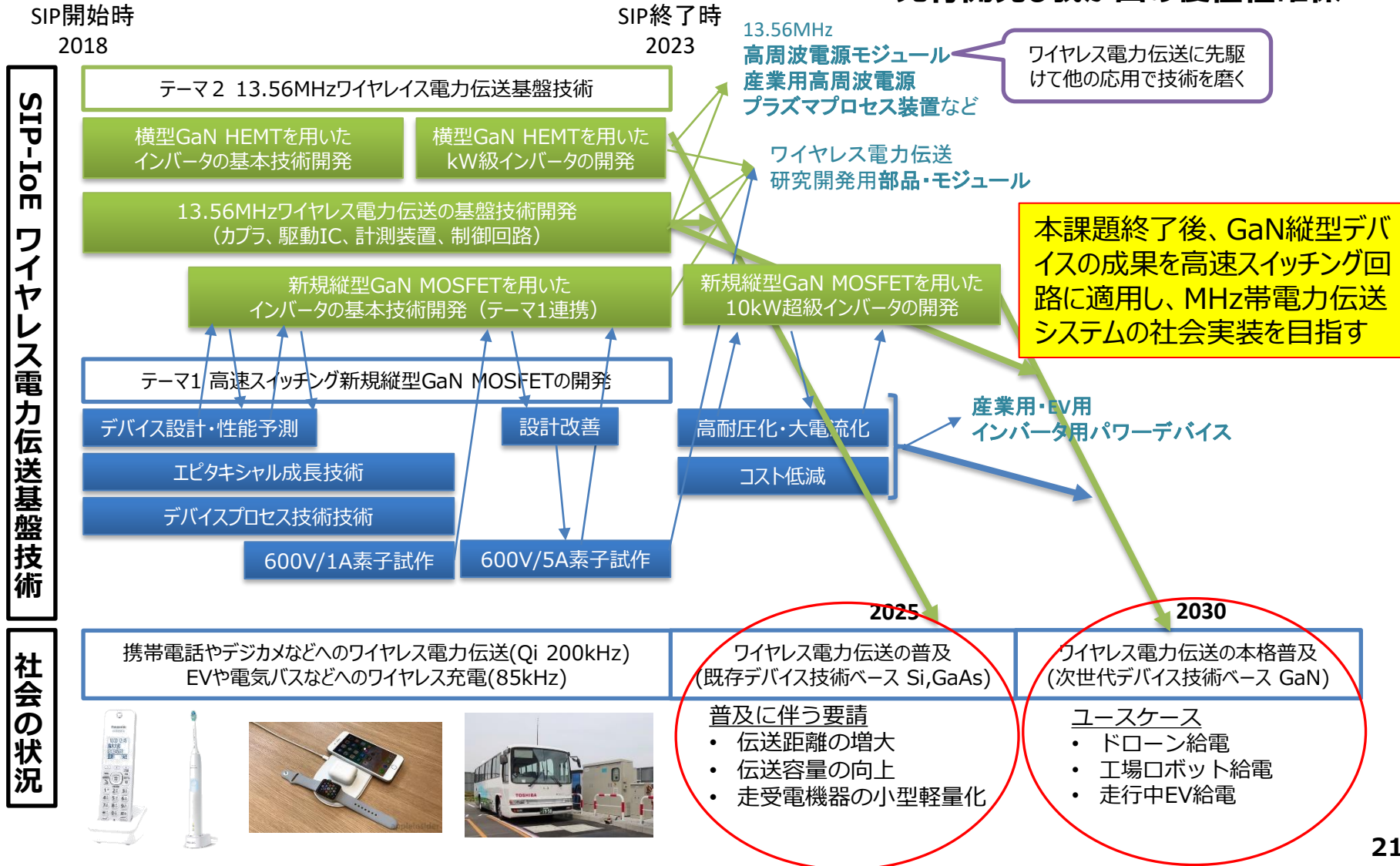
社会実装に向けた体制構築の状況

- 名古屋大学とシャープとの連携は完了、高周波駆動可能なゲート駆動ICの市場における効果的な導入タイミングと必要な付加機能を検討する。
- 古河電工と名古屋大学と産総研が連携し、構築したインピーダンス計測システムを用いてインピーダンス評価に入る予定

社会実装の実現可能性 (MHz帯WPTロードマップ)

MHzワイレス電力伝送の基盤技術開発 社会実装に向けた戦略

市場・ニーズの高まりに先行して
時間のかかる**基盤技術**を**産学連携**で
先行開発し我が国の**優位性確保**



成果の対外的発信

取り組み方針

論文誌/国際会議への発表の他、セミナーでの発表等を積極的に実施する

主要な実績（以下は主催・オーガナイザとして開催）

- 電子情報通信学会2020年ソサイエティ大会シンポジウムセッション
（BS-6. ワイヤレス給電社会を支えるエネルギーエレクトロニクス技術・赤津観（横浜国大）、原信二（名古屋大）、居村岳広（東京理科大））※オーガナイザ：山本真義（名古屋大学）
- MWE2020 WPTワークショップセッション
（次世代自動車用ワイヤレスパワー給電システム最前線・増田満（古河電気工業(株)）、日下佳祐、伊東淳一（長岡技術科学大学）、畑勝裕（東京大学））※オーガナイザ：山本真義（名古屋大学）
- 論文発表、学会発表
論文掲載15件、国際学会21件、国内学会33件（事業期間全体）
- 国内外の学会、会議等で4件の招待講演を実施

主な実績（学術論文）

1. Keisuke Kusaka, Keita Furukawa, Jun-ichi Itoh, “Development of Three-Phase Wireless Power Transfer System with Reduced Radiation Noise,” IEEJ Trans. on Industry Applications, Vol. 8, No. 4, pp. 600-607 (2019)
2. S. Jodo, T. Iwaki, K. Uchiyama, M. Islam, K. Kataoka, Y. Hayasaka, J. Imaoka, M. Yamamoto, K. Niitsu “A simple gate driver design for GaN-based switching devices with improved surge voltage and switching loss at 1-MHz operation” Japanese Journal of Applied Physics, vol.60, no. SAAD02, Jan. 2021.
3. A.Oyane,T.Senanayake,M.Masuda,J.Imaoka,M.Yamamoto,“13.56MHz Half-Bridge GaN-HEMT Resonant Inverter Achieving High Power, Low Distortion, and High Efficiency by L-S Network”, IEICE Trans. on Electronics, vol.E105-C,No.9, 2022
4. Keisuke Kusaka, Rintaro Kusui, Jun-ichi Itoh, Daisuke Sato, Tetsu Shijo, Shuichi Obayashi, Masaaki Ishida, "A 22kW Three-phase Wireless Power Transfer System in Compliance with CISPR 11 and ICNIRP 2010," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 11, No. 4, pp. 594-602 (2022)

個別テーマ 3

「ワイヤレス電力伝送高周波デバイスの開発」

背景・目的

個別テーマ3 「ワイヤレス電力伝送高周波デバイスの開発」

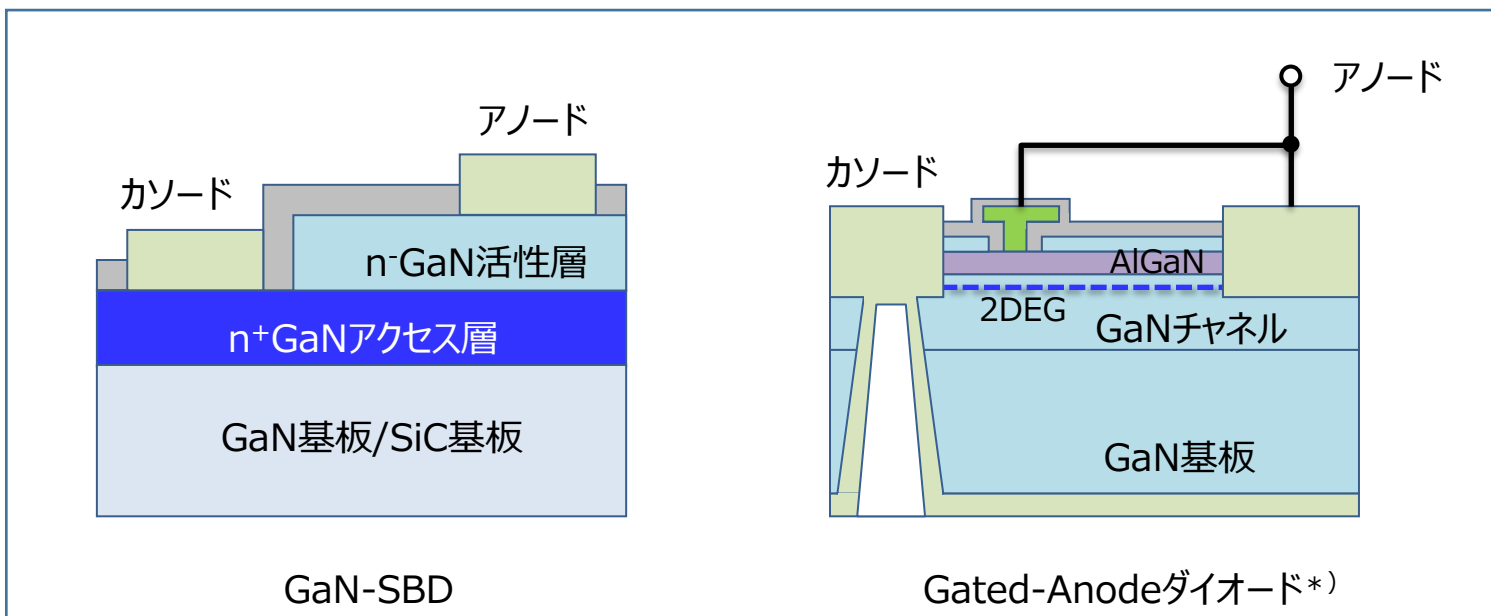
内容：

マイクロ波を用いた放射型ワイヤレス伝送システムのデバイス技術としてGaNデバイスの特性を生かした、大電力受電性能を可能にする整流用ダイオードの研究開発

競争力を確立するための特長：

GaNダイオード (10Wクラスのマイクロ波整流素子)

- GaNショットキーダイオード
- Gated-Anode ダイオード、逆方向耐圧100V以上、順方向電流100mA/mm以上
→GaNの高耐圧性を生かした電力用整流素子*)



*) トランジスタ (HEMT) 動作とは異なる受動素子動作を実現する構造に特長を持つ

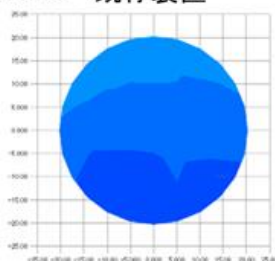
SIPで得られた主要な成果まとめ

①エピタキシャル成長

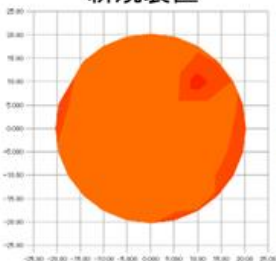
Siパワー半導体ウエハサイズと同じ直径8インチGaN基板に対応可能なエピタキシャル成長技術を確認

- ・低欠陥密度
- ・高均一性（組成、膜厚、電気特性）

Q2DEG 既存装置



新規装置



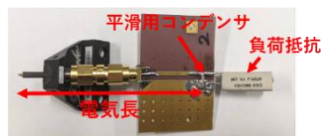
GaN-GADに重要な2DEG濃度の面内依存性

③整流器評価

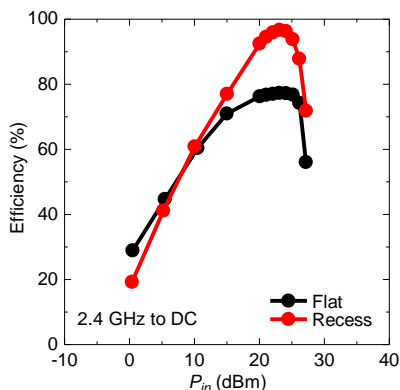
GaN-GADを用いた2.4GHz 300mW級素子にて、3倍波までの高調波処理により世界最高レベルの変換効率を確認

実測時に回路設計
シミュレーションをもとに
固定回路を作製

整流器素子評価システム



整流特性評価用負荷回路

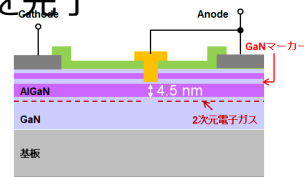


GaN-GAD 5.8GHz, 10W化に向けた整流器としての基本特性評価（2.4GHz）

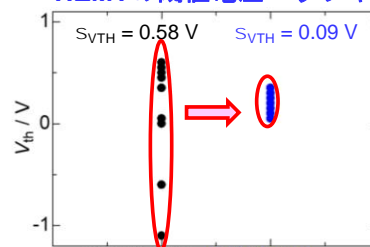
②ダイオード構造とプロセス

10W級GaN-GADの基本設計を完了

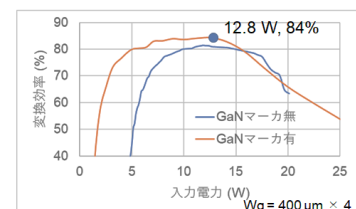
- ・大電流高耐圧特性を両立するゲートリセス構造を採用
- ・電気的特性ならびに制御性の面で量産適用に目途



HEMTの閾値電圧バラツキ



改善構造により閾値制御性も向上



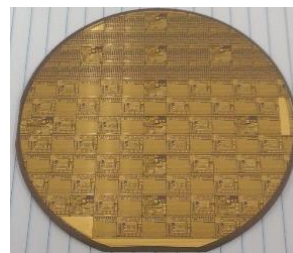
整流特性（効率マッチ simulation）

ブリッジ整流器特性予測

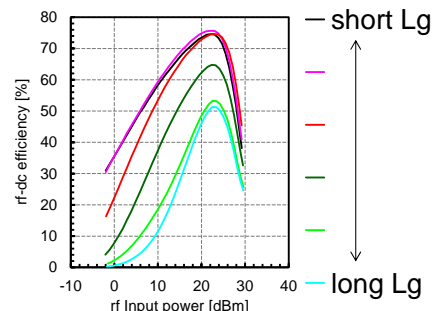
④製造ラインでの試作

製造ラインにおける1W級及び10W級GaN-GAD 10W級動作に向けたDC特性指標を確認

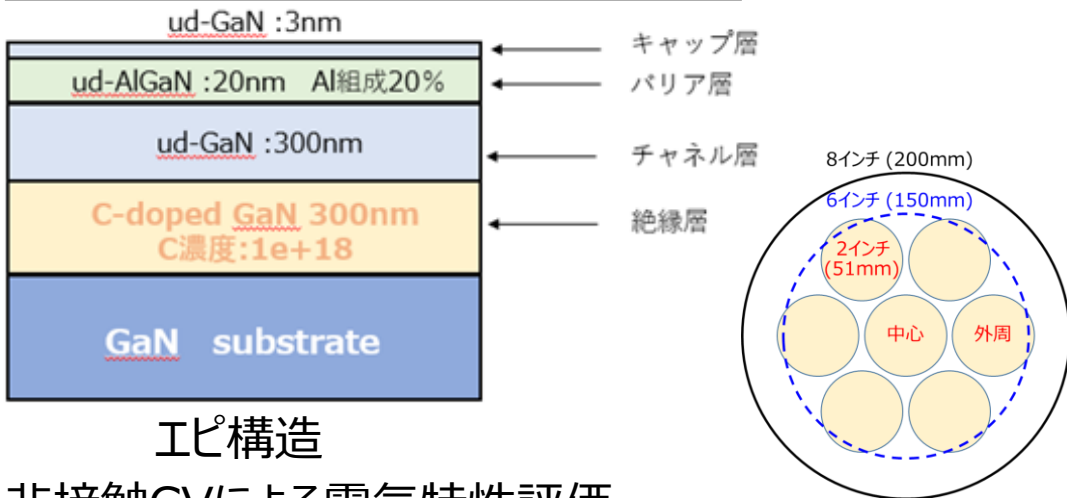
- ・順方向電流 >0.1A (1A/mm)
- ・耐圧 >100V
- ・量産ライン試作素子にて、効率75%@5.8GHzを実証



製造ラインによる4インチ
GaN-GAD試作



2インチウエハ HEMT構造の評価

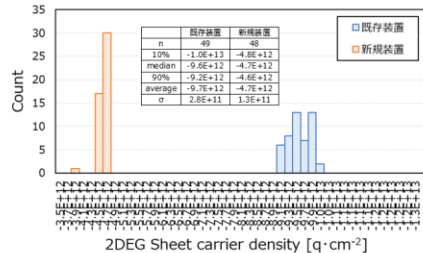
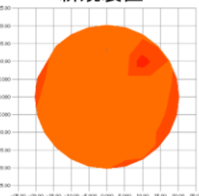
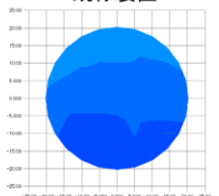


エピ構造

非接触CVによる電気特性評価

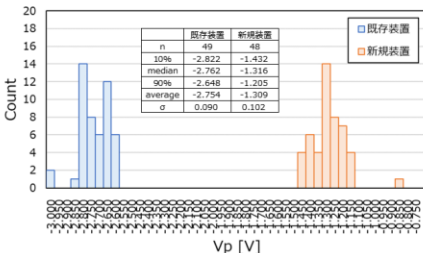
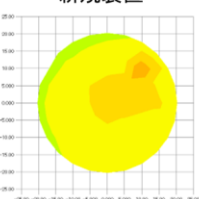
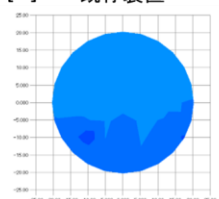
Q2DEG 既存装置

新規装置

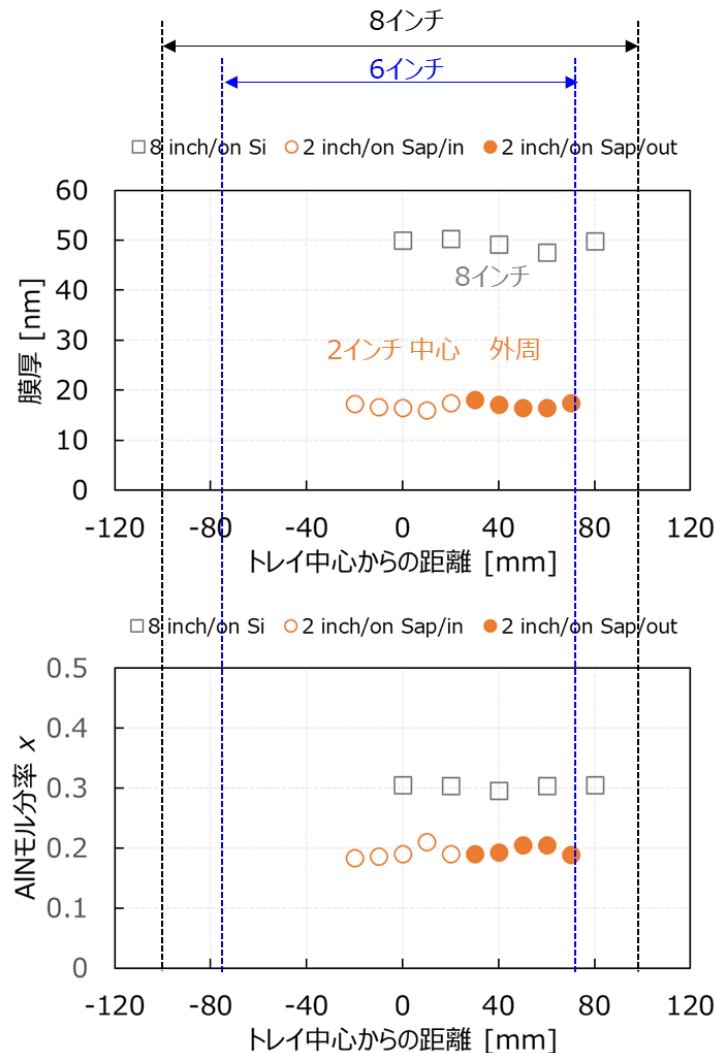


Vp[V] 既存装置

新規装置



X線回折AlGaNバリア膜厚・組成分布

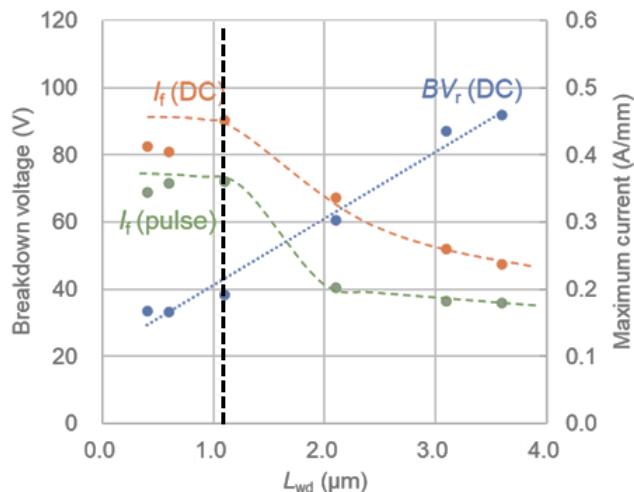
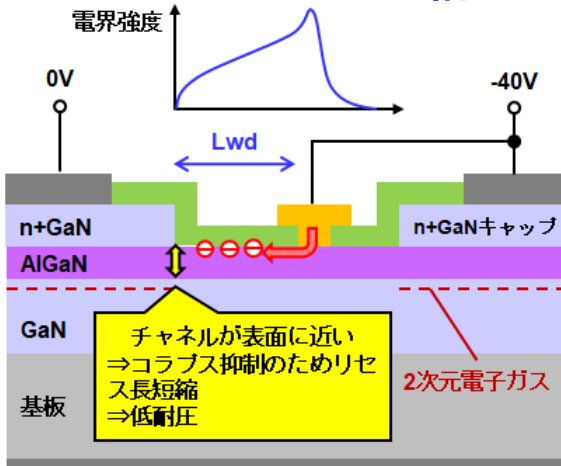


最大直径8インチGaN基板に対応可能なエピタキシャル成長技術を確立
・ 低欠陥密度 ・ 高均一性(組成、膜厚、電気特性)

SIPで得られた主要な成果③-2

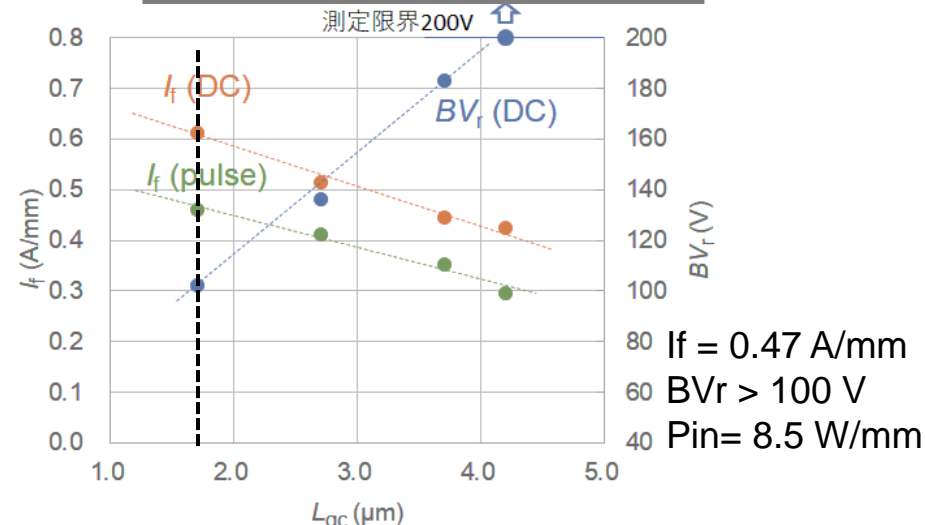
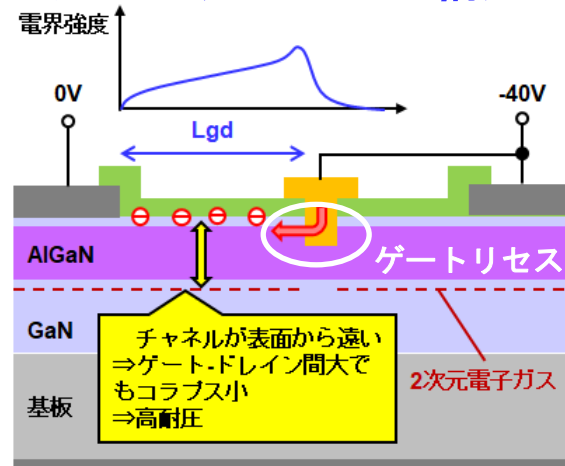
②ダイオード構造とプロセス

ワイドリセスGAD構造^[1]



$I_f = 0.36 \text{ A/mm}$
 $BV_r = 40 \text{ V}$
 $\text{Pin} = 3.6 \text{ W/mm}$

ゲートリセスGAD構造^[2]



$I_f = 0.47 \text{ A/mm}$
 $BV_r > 100 \text{ V}$
 $\text{Pin} = 8.5 \text{ W/mm}$

[1] H. Takahashi et al., Electron. Lett., vol. 57, pp. 810, 2021.

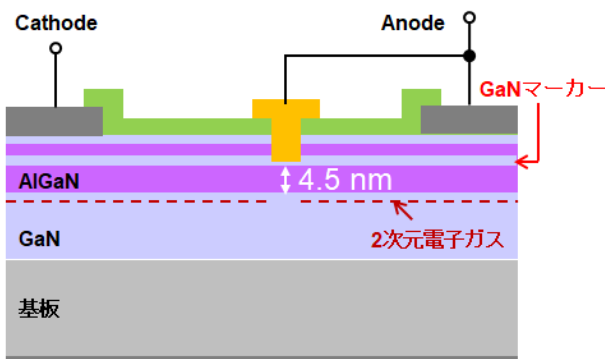
[2] H. Takahashi et al., presented at IWN 2022 (Berlin, Oct. 2022).

・ 10 W整流器実現のポテンシャルは両構造で実証済み

・ 性能ではゲートリセス、量産性ではワイドリセスが優れる

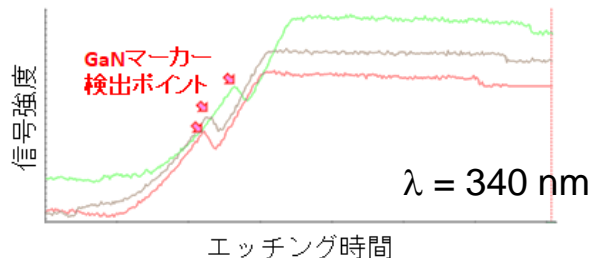
⇒ 基本設計をゲートリセス構造に一本化 (GaNマーカーにより閾値制御性改善)

改善版ゲートリセスGAD



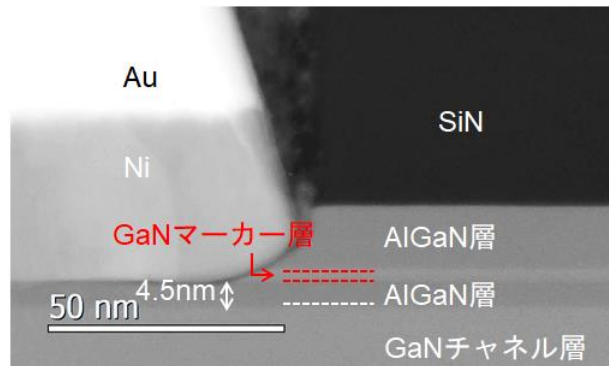
AlGaInのエッチング停止位置にGaN
マーカー層を導入

光学干渉式モニター波形



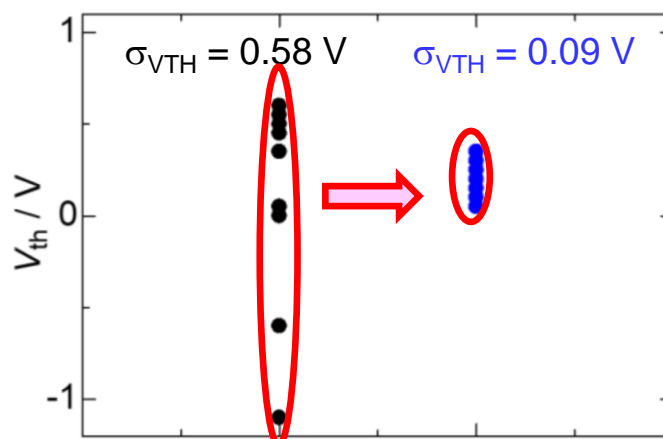
GaNマーカー検出時点でエッチング
の手動停止が可能

改善版GADの断面TEM像



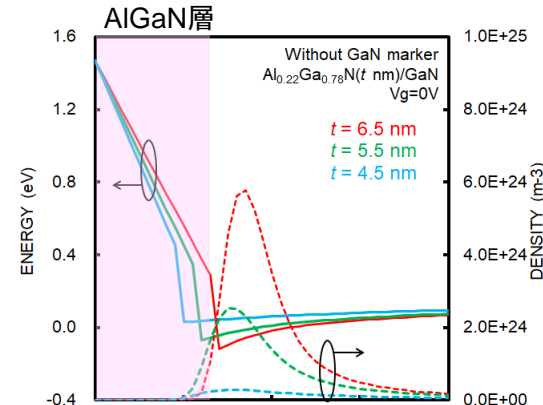
設計通りのAlGaIn残し厚4.5nmを実現

HEMTの閾値電圧バラツキ

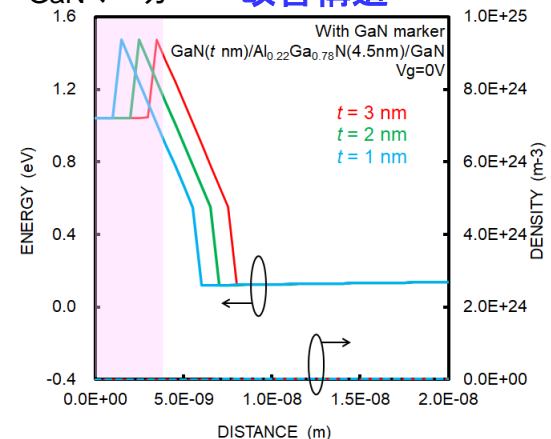


従来構造 改善構造

従来構造



GaNマーカー 改善構造

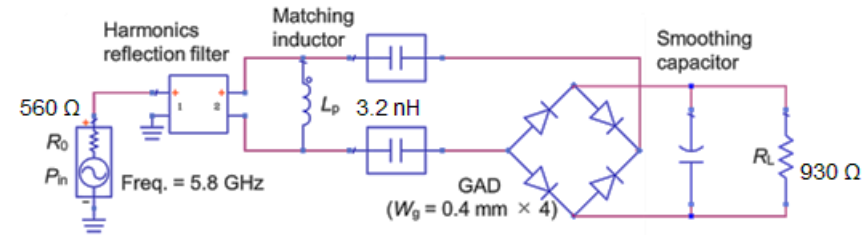
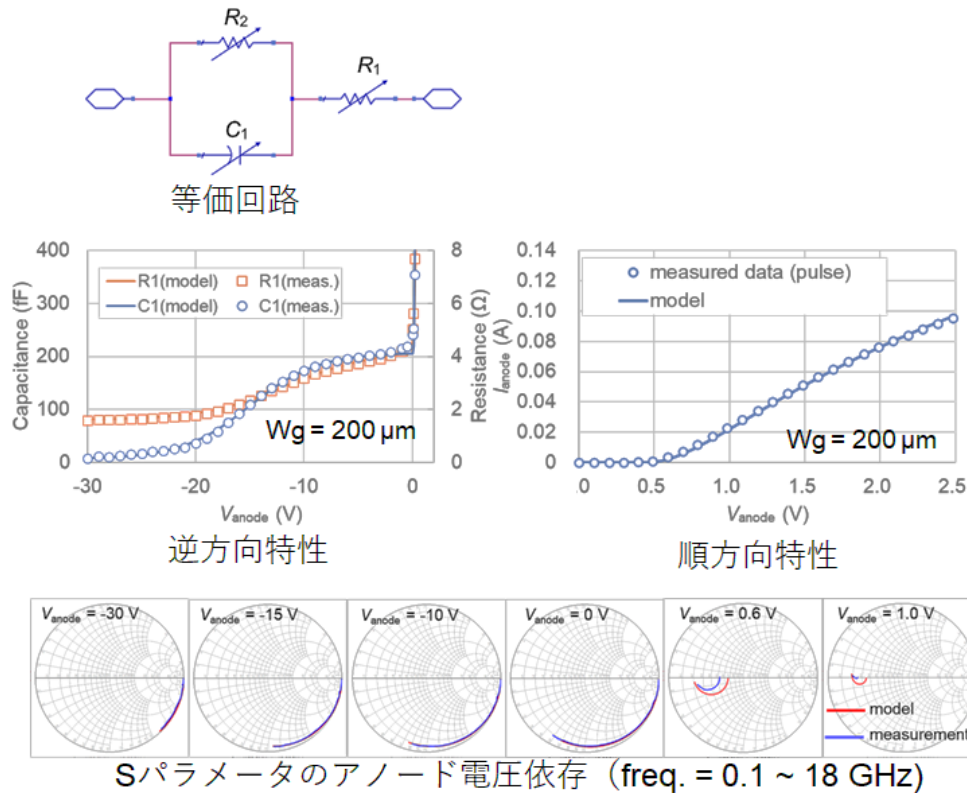


改善版は閾値でGaNマーカー層内の電界
強度がゼロになるため、GaNマーカー層厚
がばらついても v_{th} は一定

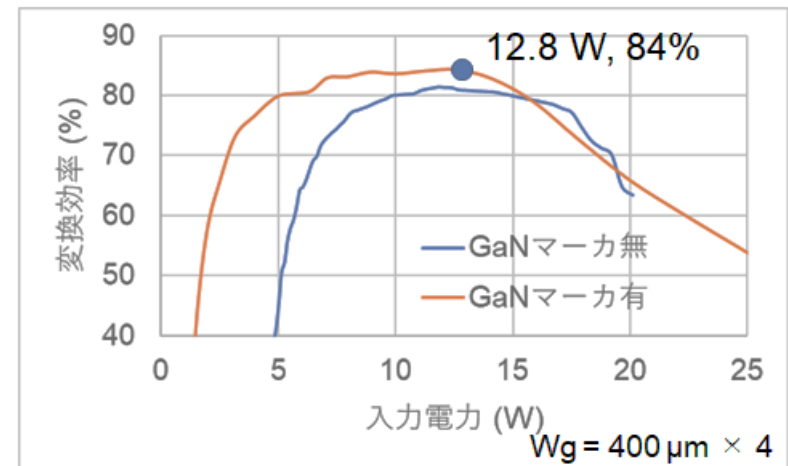
- ・ GaNマーカー挿入により光学干渉式モニターでのエッチング終点検出が可能に
⇒従来版ゲートリセス構造と比べて閾値制御性が向上
- ・ エッチング停止機構無いが、面内均一性が向上（エッチング量変化しても閾値一定）

改善版ゲートリセスGAD大信号モデル

整流特性シミュレーション



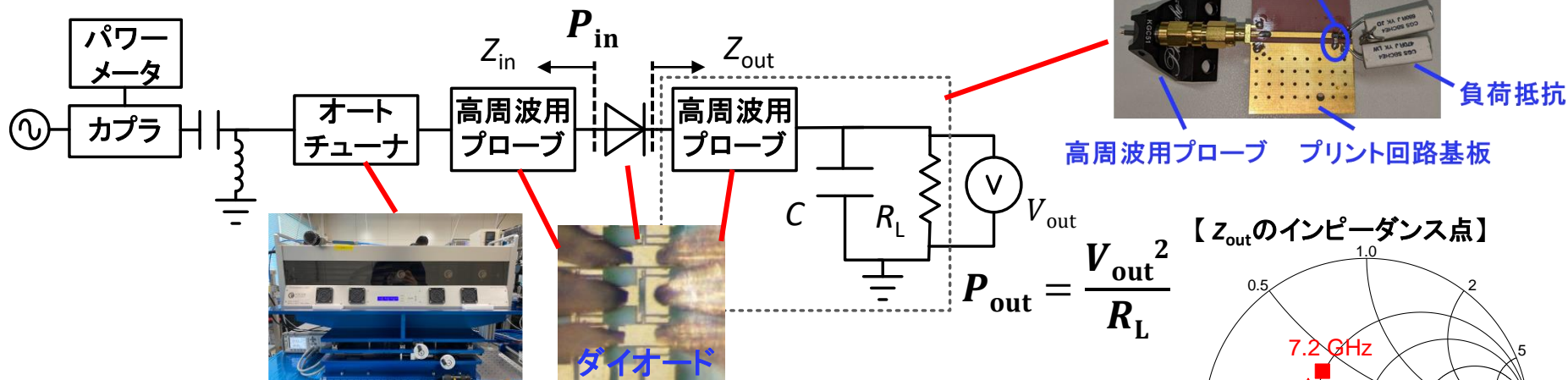
ブリッジ型整流回路



整流特性 (効率マッチ simulation)

- ・ I-V特性とSパラの測定結果に基づいて改善版ゲートリセスGADの大信号モデルを抽出
- ・ 10W級整流回路をシミュレーション。従来版ゲートリセスGADを上回る効率特性を予測

オンウエハのダイオードに対応した評価系を構築



出力回路の構成

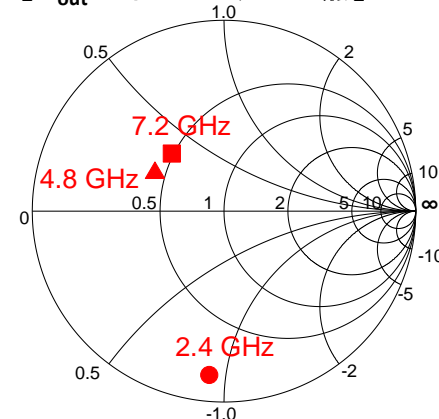
- 高周波用プローブとプリント回路基板を一体化
- プリント回路基板上に負荷抵抗(1150 Ω)、平滑用コンデンサ(10 pF)を搭載

Spiceのダイオードモデルを用いた非線形回路シミュレータによって、効率が最大になるように設計

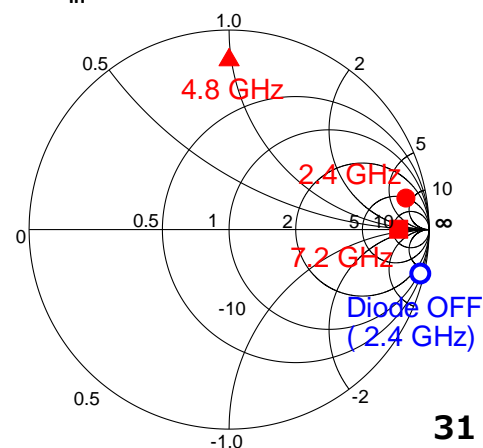
入力インピーダンス整合

オートチューナを用いて、 Z_{in} の基本波(2.4 GHz)、2倍波(4.8 GHz)、3倍波(7.2 GHz)を整合

【 Z_{out} のインピーダンス点】

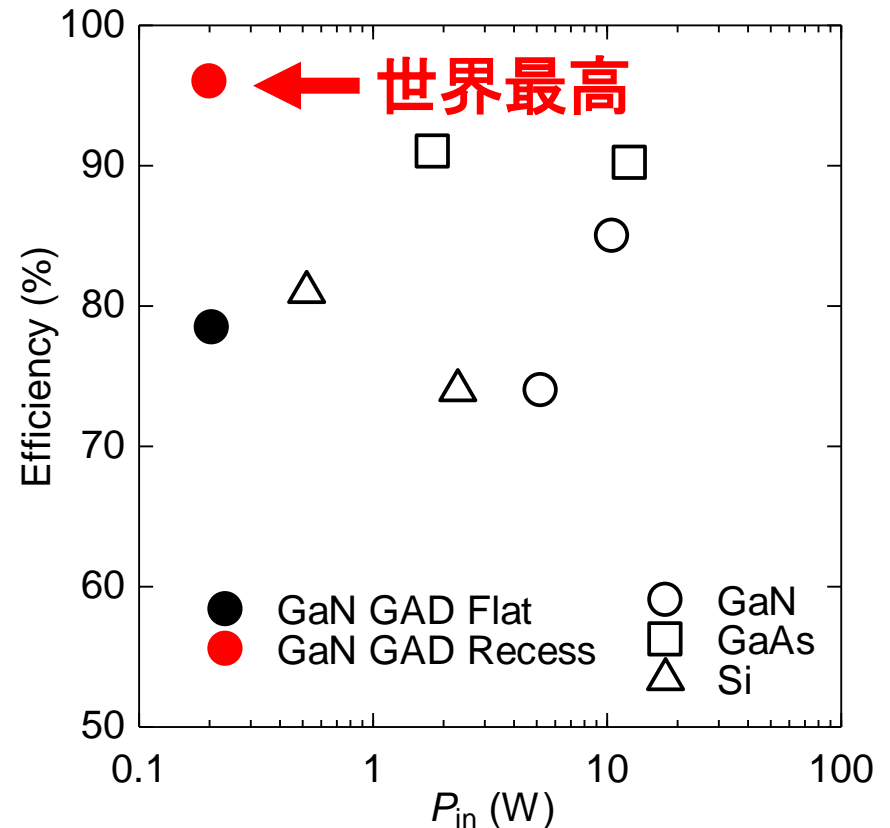
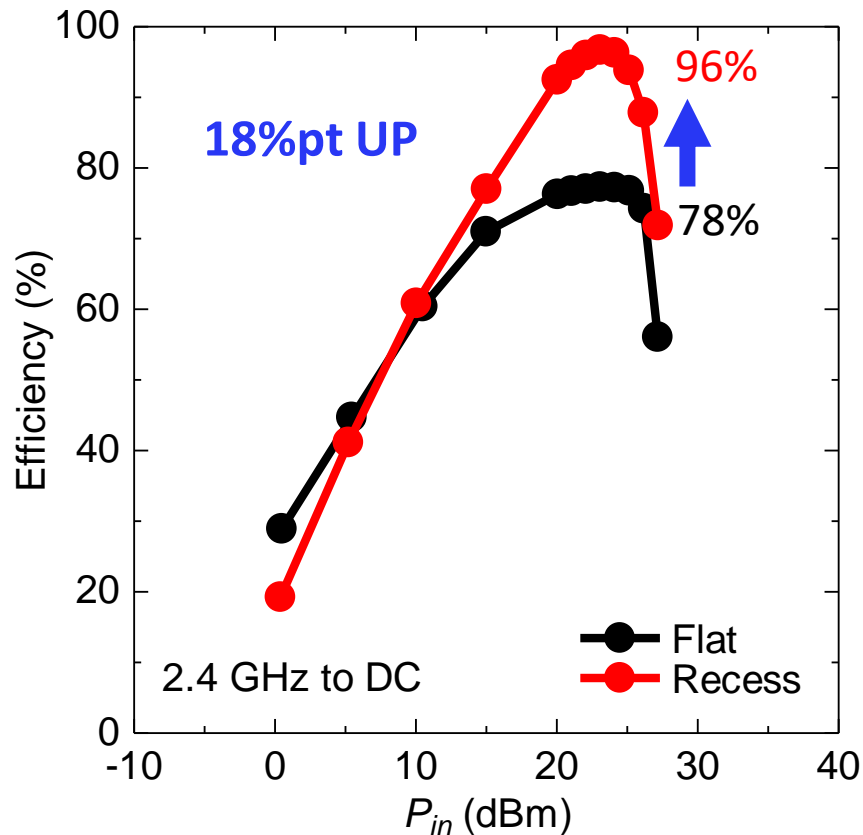
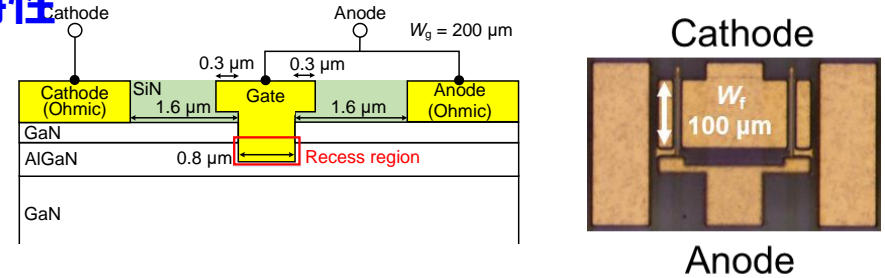


【 Z_{in} のインピーダンス点】



名古屋大学試作素子にて2.4GHz高効率整流特性

- リセス構造にて、最大効率が18%pt上昇
(96%@23 dBm)
- 世界最高効率 96%を実測にて確認



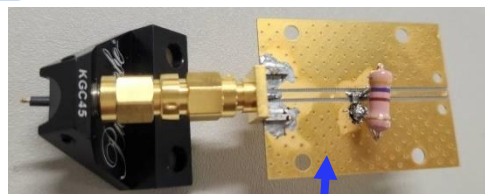
名古屋大学試作素子の5.8GHz整流特性

周辺回路・アンテナの小型化に向けて2.4 GHz→5.8 GHz

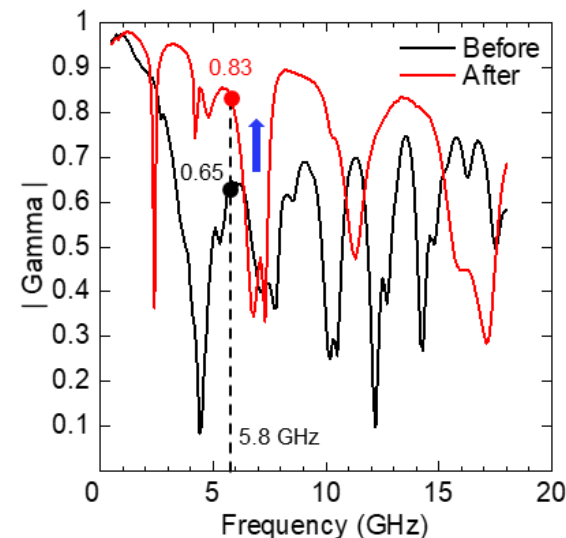
5.8 GHzに対応した出力回路の作製

低損失な材料のプリント回路基板を用いた出力回路を作製

$|Γ(@5.8\text{ GHz})|$: 0.65 → 0.83

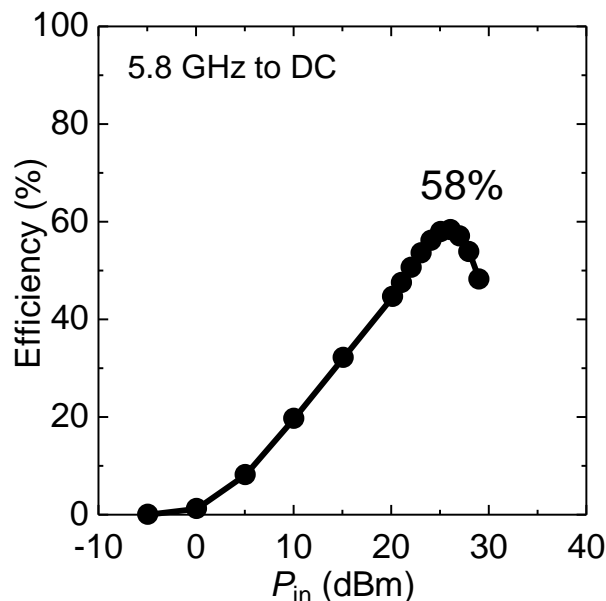


低損失回路基板

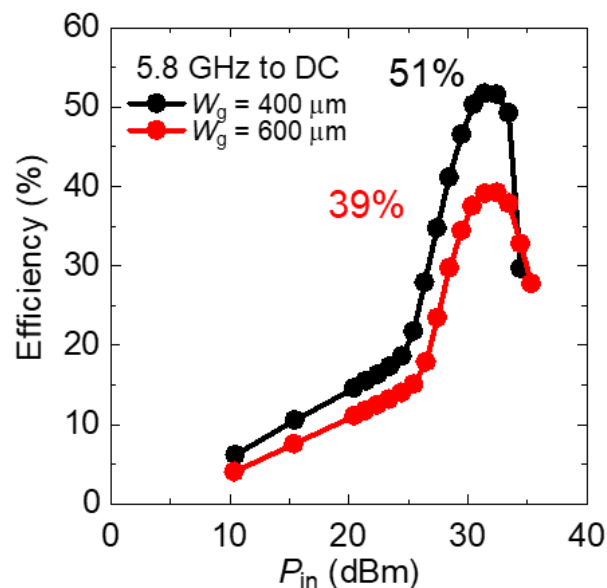


5.8 GHzマイクロ波整流特性

W級基本素子にて最大効率58%を取得

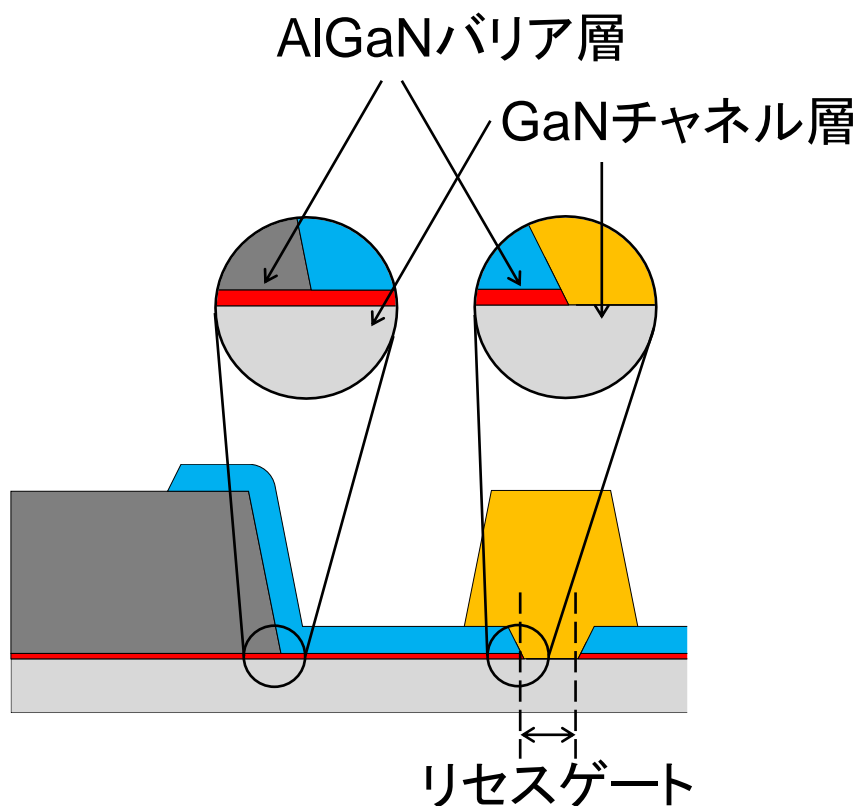


Over 1W素子にて、最大効率51%

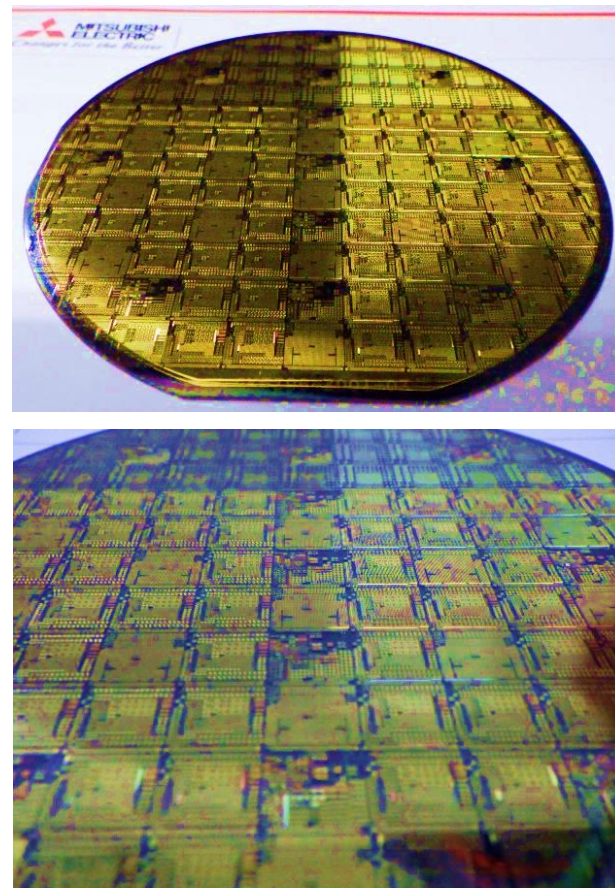


製造ラインを用いたゲートリセスGAD試作

- GaNを用いた10 W級ゲートリセスGADを試作。
- 10 W級動作に向けたDC特性指標とした・100 mA以上の順方向電流(1 A/mm), ・100 V以上の耐圧, ・1 pF以下の0 V時容量(1 pF/mm)を達成。



ゲートリセスGADの断面模式図

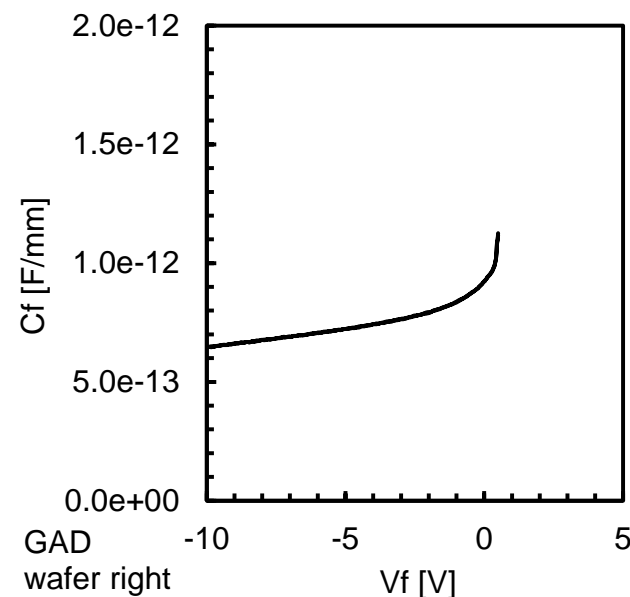
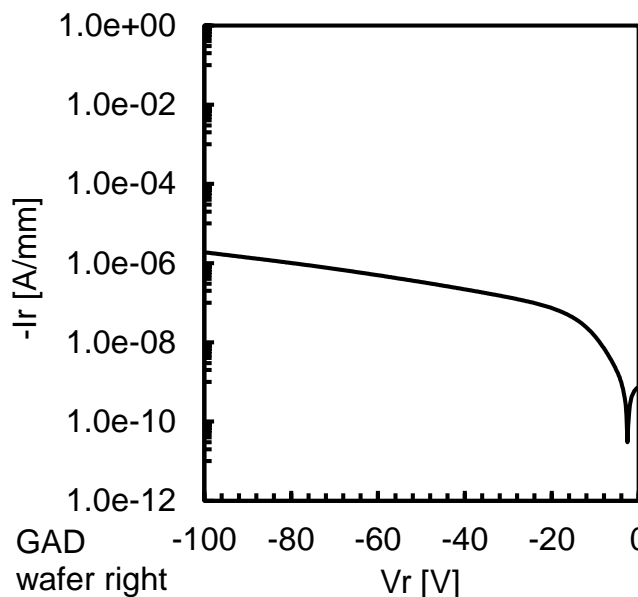
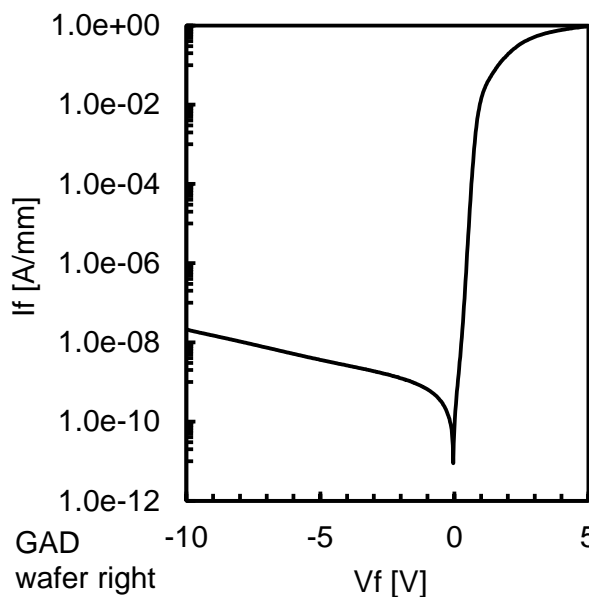


試作中ウェハの外観

製造ラインを用いた10W級ゲートリセスGAD試作

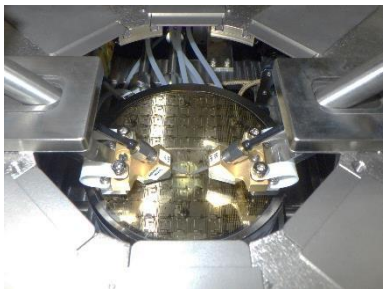
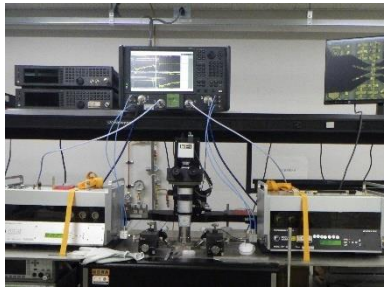
■ 小型TEGにより10 W級動作に向けたDC特性指標を達成

- ・100 mA以上の順方向電流(1 A/mm),
- ・100 V以上の逆方向耐圧,
- ・1 pF以下の0 V時容量(1 pF/mm)

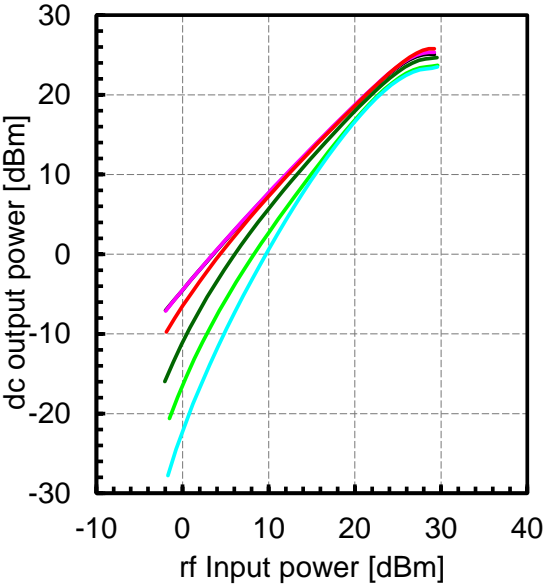
ゲートリセスGADの
順方向電流電圧特性
(小型TEG)ゲートリセスGADの
逆方向電流電圧特性
(小型TEG)ゲートリセスGADの
容量特性
(小型TEG)

製造ライン試作のW級ゲートリセスGADの整流特性評価

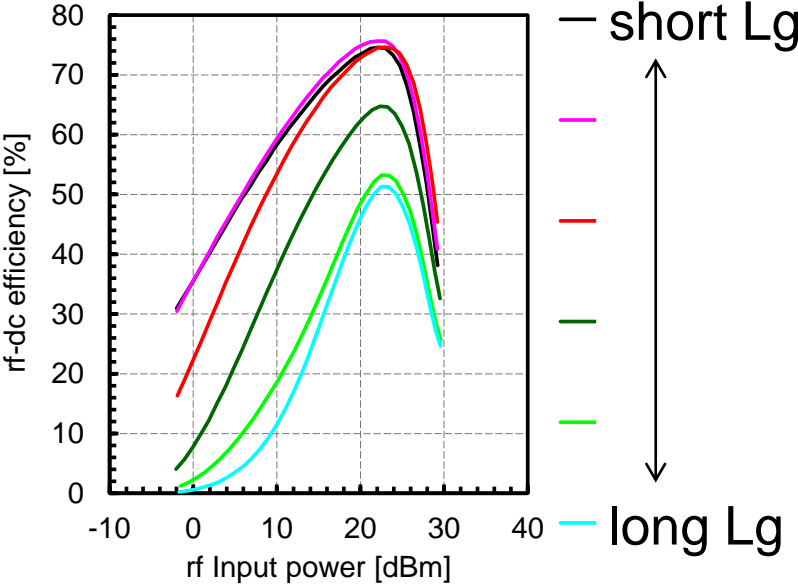
- チューナを使った簡易評価系で5.8 GHz rf-dc特性オンウェハ評価。
- 小型単体ダイオードの5.8 GHz帯rf-dc変換(変換効率75%)。



評価系



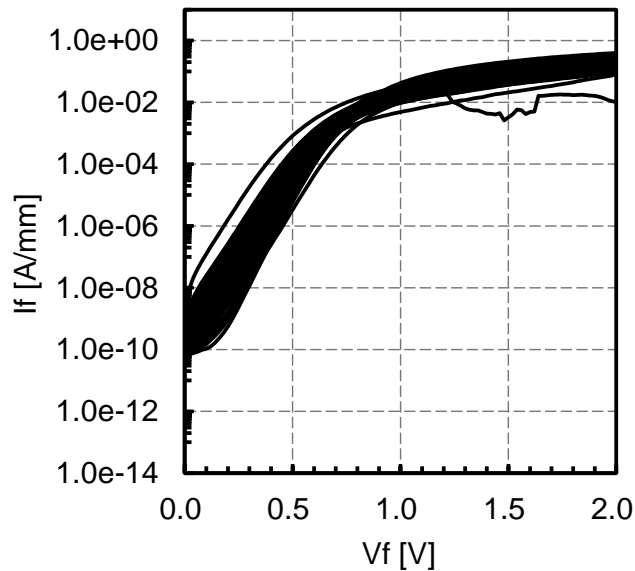
大電流版GADの
入出力特性
(小型TEG)



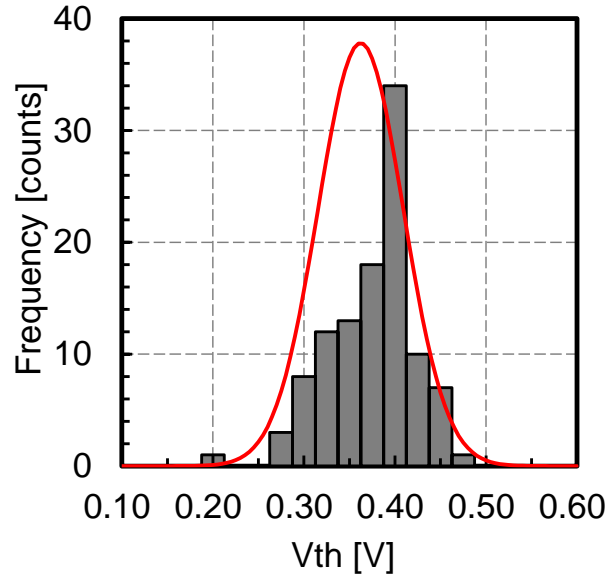
大電流版GADのrf-dc
変換効率
(小型TEG)

製造ライン試作ゲートリセスGAD試作の特性分布

■試作中のTEG評価によりウェハ面内特性分布を確認。ダイオード立ち上がり電圧は中央値0.37 V, 3σ 0.14 Vと初試作としては比較的良好な特性分布。

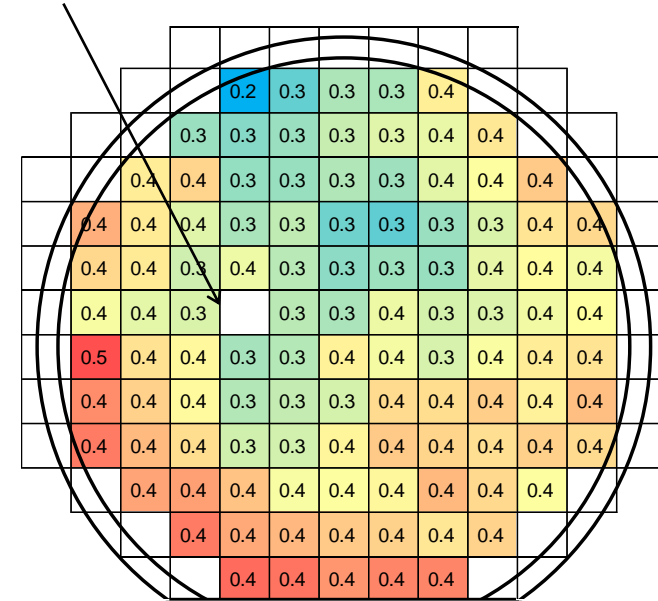


順方向電流電圧特性



Vthヒストグラム特性

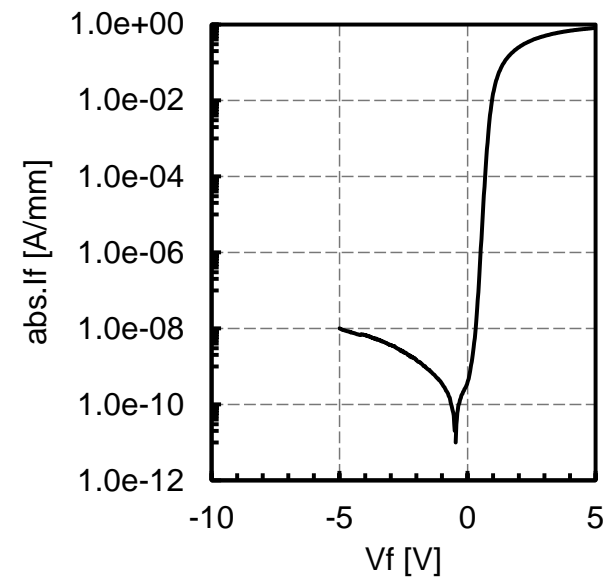
加工モニタショット



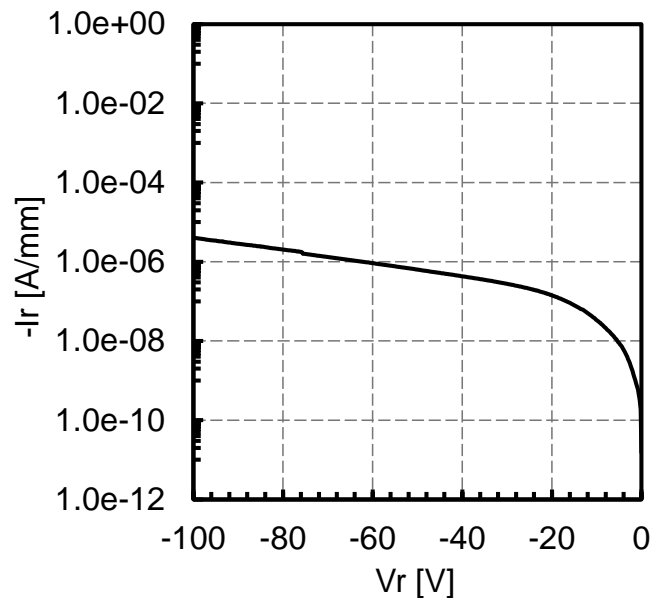
Vth特性マップ

10W級整流素子のためのダイオード特性

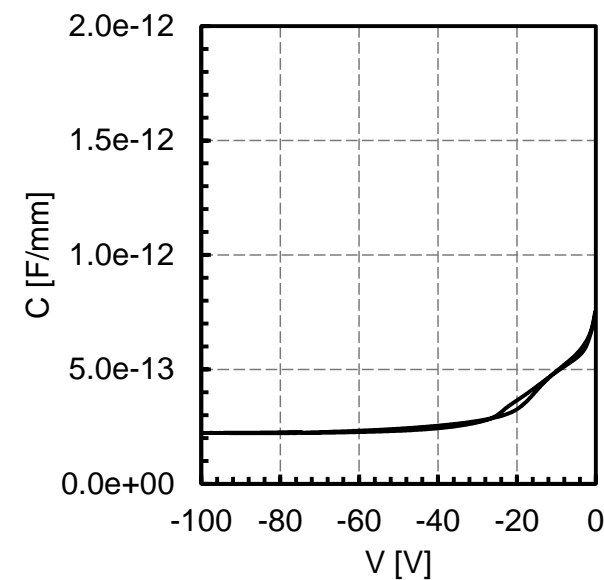
■ 10 W級サイズ(Wg)の単体ダイオードにより, 小型TEGと同様の特性(順方向電流, 逆方向耐圧, 0V時容量)を確認した。



ゲートリセスGADの
順方向電流電圧特性
(10 W級サイズ単体TEG)



ゲートリセスGADの
逆方向電流電圧特性
(10 W級サイズ単体TEG)



ゲートリセスGADの
容量特性
(10 W級サイズ単体TEG)

社会実装の実現可能性

2025年までの出口戦略

- 三菱電機の製造ラインを用いたデバイス試作により、完成度の向上
- デバイスユーザ、マイクロ波電力伝送ユーザとの議論を活性化

2022年度末での社会実装の達成見込み

- 電力伝送技術の目安と考えるワットクラスの整流素子を実現
- 製造ラインを用いたデバイス試作完了。基本素子レベルの整流特性評価実施。
- （今後の課題）大電力素子構造の動作実証。

社会実装に向けた体制構築の状況

- 参画機関である三菱電機に社会実装に向けた具体的な計画を立案し、推進する社会実装責任者を設置。実用化可能なデバイスの議論、ユーザーニーズの具現化を並行して進めている。
- （今後の課題）法規制の問題と、現在、議論をしているアプリケーションが飛行中ドローン給電や宇宙太陽光発電を中心としているため、商用化時期が現状は不透明。潜在アプリ開拓により、市場の早期立ち上げを後押し。
- システム開発段階のユーザに対するデバイス供給といった黎明期のサプライチェーン体制について議論をすすめる。

成果の対外的発信

取り組み方針

論文誌/国際会議への発表の他、セミナー、プレス発表等を積極的に実施

主な実績

- GADの基本特性とRF-DC変換特性予測を国際論文誌にて発表（2021年6月）
- GAD特性についてWPT関連国際シンポジウム（IEEE MWE）にて発表（2021年9月）
- 化合物デバイスの国際会議にて、2.4GHzの整流特性を発表（2022年9月）
- 国内外の学会、会議等で3件の招待講演を実施

英文論文 2 件、国際学会 3 件、国内学会 9 件、（事業期間全体）

招待講演

1. 分島彰男、「GaN系HEMTを用いたマイクロ波無線電力伝送整流用ダイオード」 2020 Microwave Workshops and Exhibition (MWE 2020)
2. Akio Wakejima, “Microwave rectification characteristics of Gated-Anode AlGaN/GaN-HEMT-Based Diode” AT-AP-RASC 2022, Union Radio-Scientifique Internationale (URSI)

他

個別テーマ 4

「マイクロ波帯電力伝送システム基盤技術の開発」

背景・目的

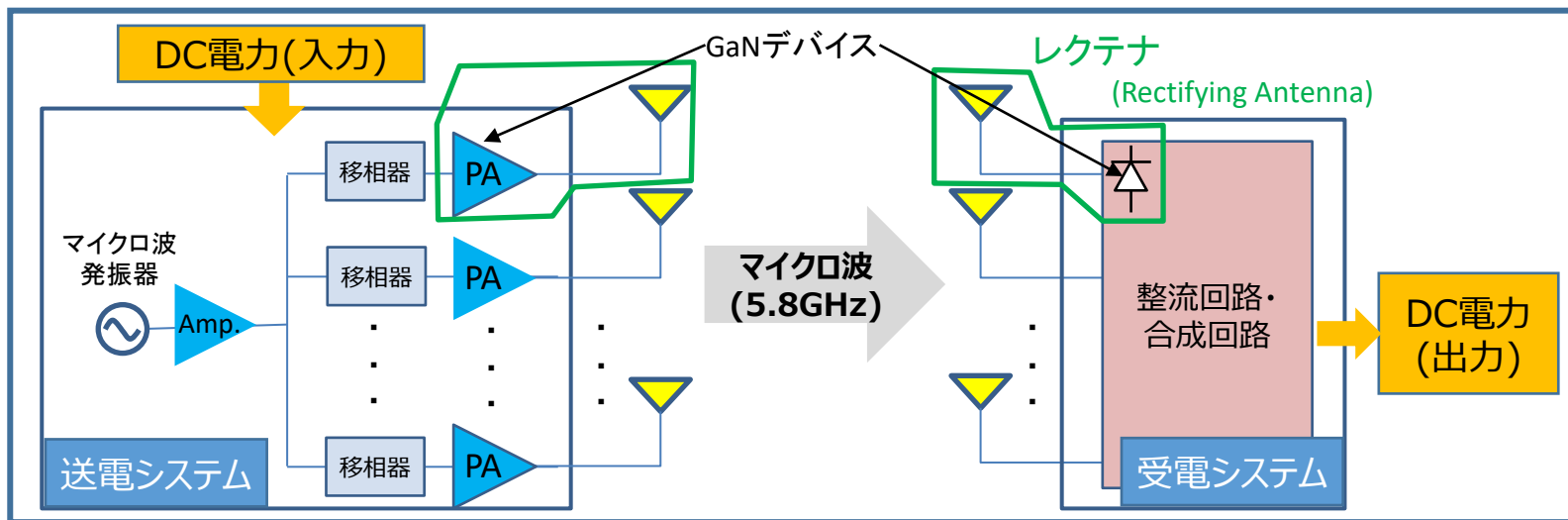
個別テーマ4 「マイクロ波帯電力伝送システム基盤技術の開発」

内容：

マイクロ波を用いた放射型ワイヤレス伝送システムの回路技術として高耐圧・高出力GaNデバイスの特性を生かした、低損失な送電/受電を実現するマイクロ波回路技術の研究開発

競争力を確立するための特長：

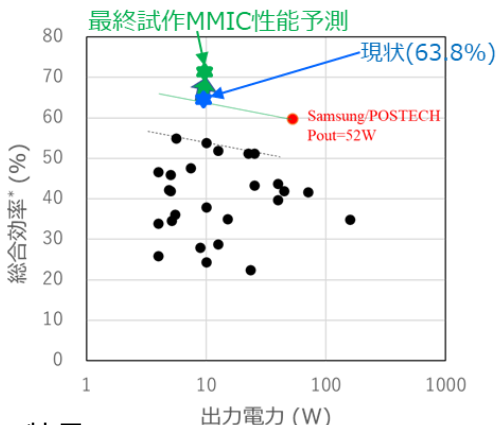
- インピーダンス設計最適化 → 高インピーダンス設計による低損失化
 - アンテナ一体設計 → 受動回路損失低減
- 以上によりPAとアンテナを一体化（5.8GHz、10W出力、総合効率60%以上）
- 高効率レクテナ設計 → 高調波処理高インピーダンスアンテナ、放熱設計
- GADを用いたレクテナ（5.8GHz、10W入力、電力変換効率70%以上）



SIPで得られた主要な成果まとめ

③高効率レクテナ

①高効率PA一体型アンテナ

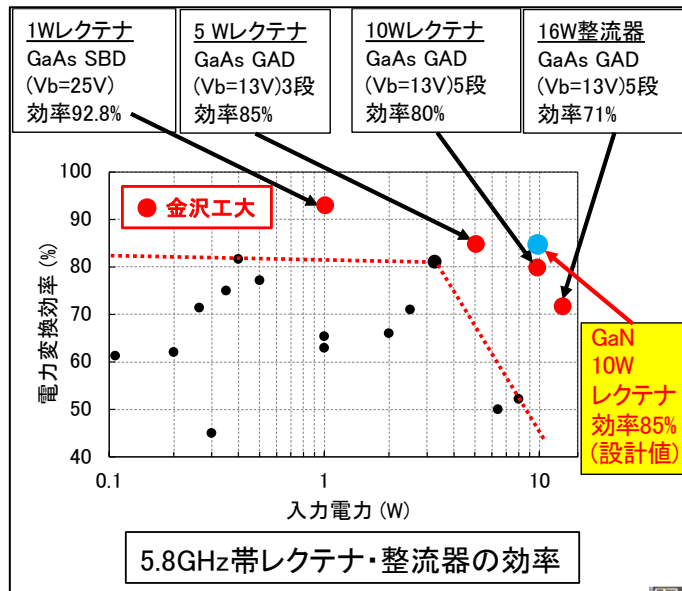


- 特長
- PAに整合回路レス多段設計法適用
 - アンテナ素子への高調波処理機能内蔵
 - PAとアンテナの一体化(PIA)

GaN HEMT MMIC 2段アンプ

高調波反射回路内蔵 Hスロットアンテナ

PA



- 特長
- (1)高調波処理高インピーダンスアンテナによる回路レス化
→回路損失の抑制
→高効率化
 - (2)ノーマリーオフFETによるGaAs/GaN Gated anode diode(GAD)
→大電流密度→大電力化
 - (3)放熱機能を有する窒化アルミニウムアンテナによる大電力レクテナ

窒化アルミニウム基板

GaAs10Wレクテナ外観

GaAs GADチップ
1.2 X 1.5 mm²

GaN GADチップ
1.1 X 1.4 mm²
評価中

受電デモ準備中

マイクロ波 (5.8GHz)

送信アレーアンテナ C-①・電気興業と連携

直流配線

放熱板

10Wレクテナ

10Wレクテナ X9アレー (180X180X36mm³)

DC: 50W

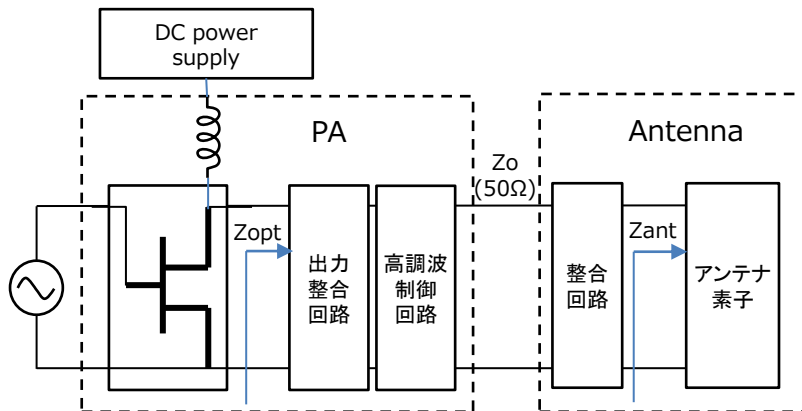
効率向上の為に新規アイデア創出により、従来性能よりも大幅な効率向上を実現

手法①：整合回路レスパワーアンプ設計手法の提案と定式化

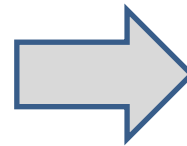
手法②：アンテナへの高調波制御機能の取り込み（名工大と共同）

手法③：多段アンプにおける新たな高効率化手法導入

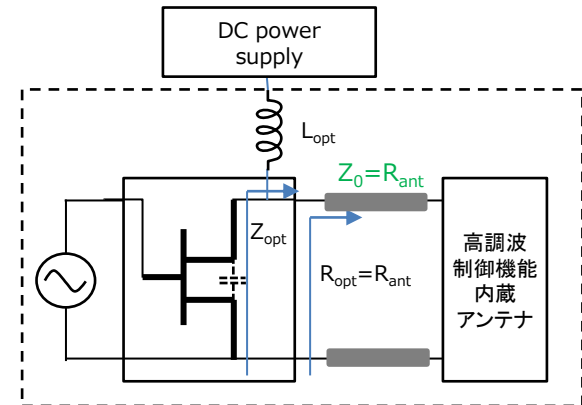
従来設計手法



手法
①&②

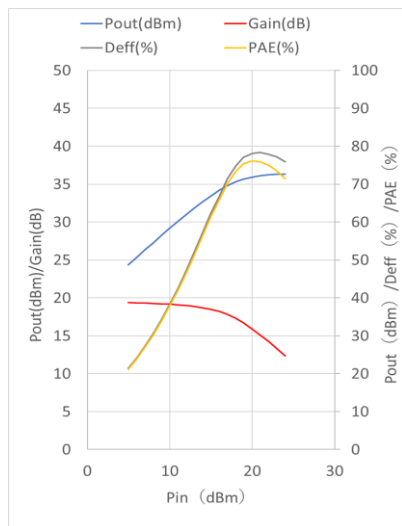


SIP成果

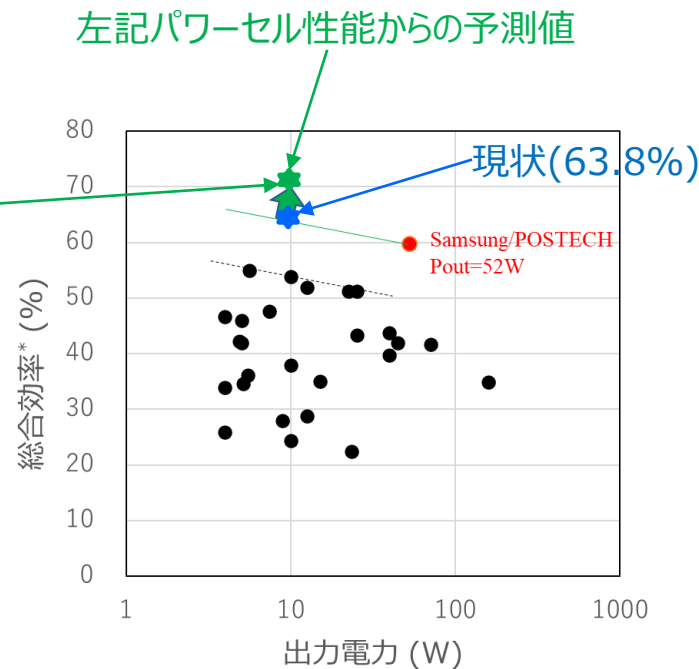
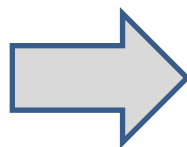


アンテナとPAの協調設計による
最適 Z_0 (50Ωとは限らない)を使用

→ 無損失化



2並列化&手法
③による多段化



ベンチマーク

(*)Georgia Tech. PA survey最新版(2023/10/4時点)から、4-7GHz帯、4W以上のPAを抜粋。ドライバー段6割仮定

独自パワーセル評価結果

手法①関連文献および特許

- S. Hara and A. Suzuki, "Matching Circuit-less Power Amplifier Design for Microwave Wireless Power Transmission Systems," Proc. 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integrated Technology, no.FR2A-2, pp.184-186, Hiroshima, Japan, Sept.2020.
- 特開2021-11482「電力増幅器」

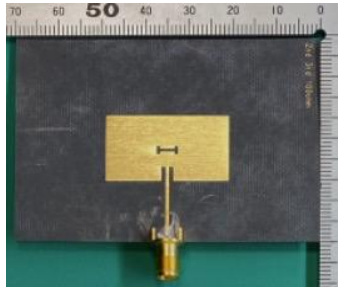
手法②関連文献および特許

- S. Hara, A. Suzuki, and H. Hirayama, "Proposal and Demonstration of Power Conversion-Chip/Amplifier Integrated Antenna," Proc. 2020 50th European Microwave Conference, no.EuMC22-4, pp.448-451, Utrecht, The Netherlands, Jan.2021.
- 特開2021-11483「無線装置」

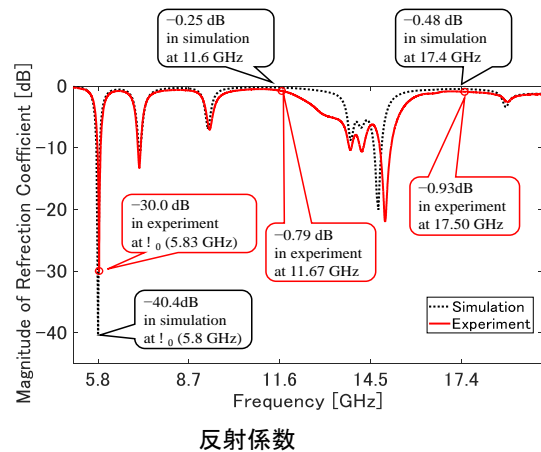
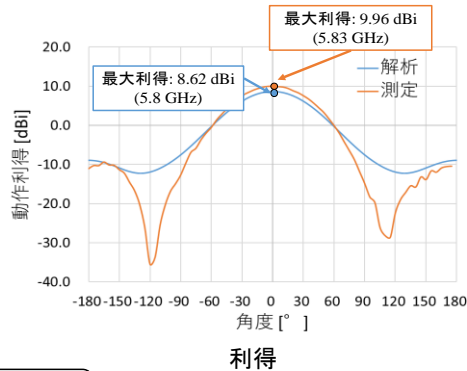
手法③関連文献および特許

- 丹波憲之、原信二、"整合回路レス設計法の多段アンプへの適用検討" "2022信学全大C-2-19、Mar.2022

成果(1) 5.8GHz 10W級 送電用高調波処理アンテナを開発した。



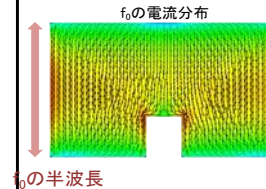
試作したアンテナ



電波暗箱による測定

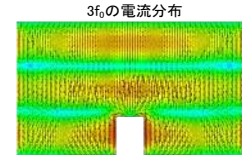
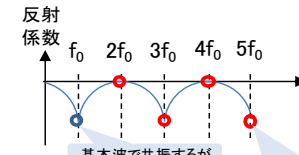
成果(2) 固有モード解析により、高調波処理メカニズムを明らかにした

基本型パッチアンテナ



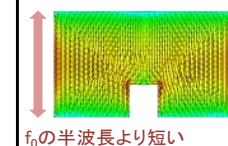
f_0 の半波長

f_0 : 使用基本波周波数 (5.8GHz)
(パッチアンテナの共振周波数ではない)

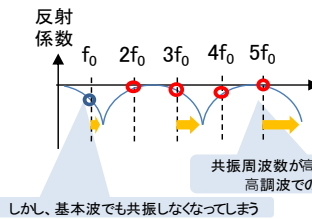


$3f_0$ の電流分布

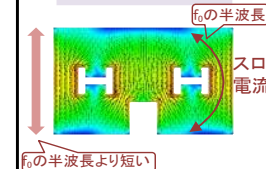
サイズを小さくした基本型パッチアンテナ



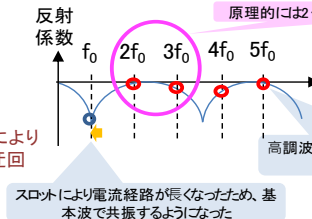
f_0 の半波長より短い



F級負荷パッチアンテナ



f_0 の半波長より短い



スロットにより電流経路が長くなつたため、基本波で共振するようになった

主要な特許

「H形スロットを付与したパッチアンテナ」出願番号:
特願2022-02750, 2022年2月出願

主要な論文

"Microstrip Patch Antenna with Class-F Load and DC Block Function for Microwave Power Transfer", IEICE Electronics Express, 2021年07月

ともに、高調波処理機能を有するパッチアンテナを提案した。

	合計	2018	2019	2020	2021	2022
論文	2			1	1	(投稿中)
国際会議	4	1			2	1
口頭発表	20	1	7 招待1含む	6 招待1含む	5	1
特許出願	6		3	2	1	

(他機関との重複分は含まず。)

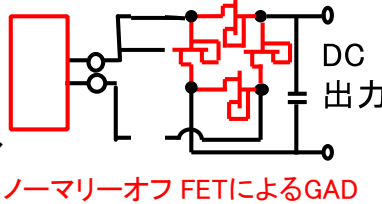
SIPで得られた主要な成果③

レクテナ

受電レクテナのアイデア

- (1)高調波処理高インピーダンスアンテナによる回路レス化→回路損失の抑制
→高効率化
- (2)ノーマリーオフFETによるGated anode diode(GAD)→大電流密度→大電力化
- (3) 放熱機能を有する窒化アルミニウムアンテナによる大電力レクテナ

全回路機能を
実装したアンテナ

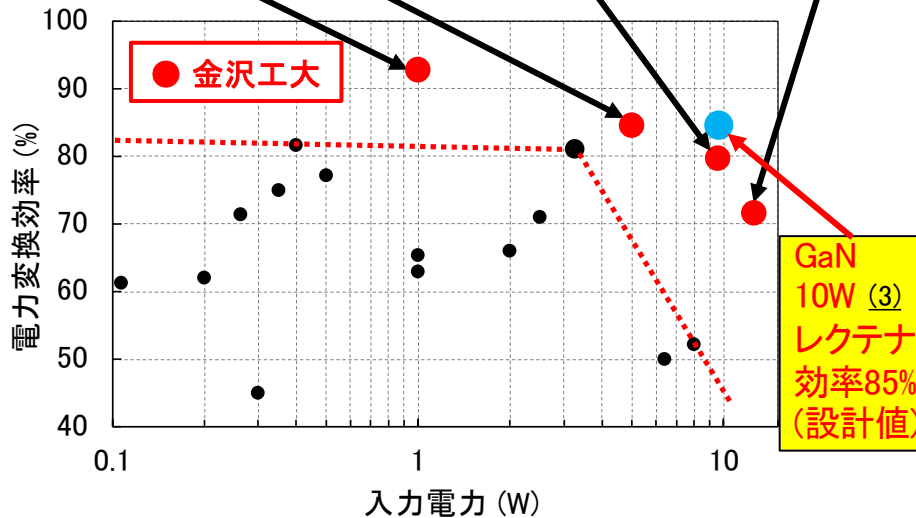


1Wレクテナ(1)
GaAs SBD
(Vb=25V)
効率92.8%

5 Wレクテナ(3)
GaAs GAD
(Vb=13V)3段
効率85%

10Wレクテナ(3)
GaAs GAD
(Vb=13V)5段
効率80%

16W整流器(2)
GaAs GAD
(Vb=13V)5段
効率71%

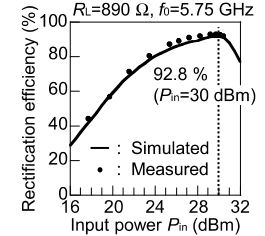
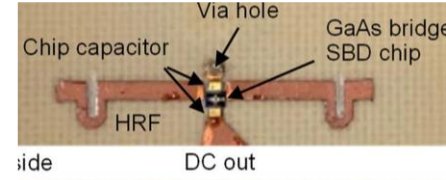


5.8GHz帯レクテナ・整流器の効率

Journal paper: 4件+2件(査読中)、査読あり国際会議: 6件、特許: 2件出願

アイデア(1) 5.8GHz帯1Wレクテナ: 世界最高効率

- ・全回路機能(インピーダンス変換、整合、高調波処理、DCカット)を5.8GHz帯アンテナに実装。回路機能実装時のアンテナ効率は98.3%。低損失である。
- ・GaAs SBD(耐圧27V)と組み合わせ、**整流効率92.8%@1W**。トップ性能。トップジャーナルで出版。

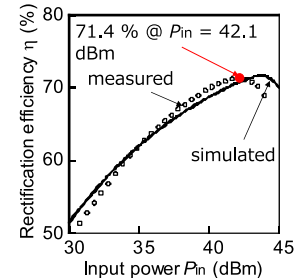


アイデア(2)5.8GHz帯16W整流器IC:10W以上での世界最高効率

- ・ノーマリOFF特性を有するGaAs EpHEMTによりGated Anode Diode(GAD)を構成。ダイオード整流器の高効率特性と、FET整流器の大電力特性を両立。
- ・整流器IC(GAD5段)で整流効率71%@16W。10Wを越える整流器としてトップ。



チップサイズ
1.8mm x 1.15mm

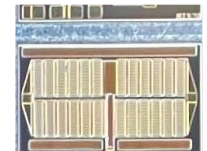


アイデア(3)窒化アルミニウムアンテナによる5W/10Wレクテナ

- ・金属同等の熱特性を有する窒化アルミニウムでアンテナを構成。5W/10W整流用GADをマウント。十分な放熱特性を実現。
- ・アイデア(1)(2)を両立させ高効率・大電力特性。GaAs: 効率85%@5W (測定)、80%@10W(測定)。GaN: 85%@10W(設計)



GAD chip



社会実装の実現可能性

2025年までの出口戦略

- ・ 課題内で製品をイメージしたパッケージ化/モジュール化まで行い、具体的な物品イメージを提供可能とする→**ベンチャー起業化検討**
- ・ **SIP成果である5.8GHz帯GaAs整流器を、WPTシステムメーカ(SIP参画社含む)へ提供する体制構築中。金沢工大からThird party(高周波機器メーカ)へIP提供。Third partyがチップ製造(ファンダリイ)+後工程(外部委託)を行い、2023年度後半を目処にWPTシステムメーカへ供給。5.8GHzWPTシステム立ち上げで最もボトルネックとなっている整流器ICの供給を行う。市場立ち上げ前のエコシステムを構築し、将来のGaN整流器普及に向けた穴あけを行う。**

2022年度末での社会実装の達成見込み

- ・ プレス/学会発表により、企業の関心が高まり、**今までに4社から受託。上記GaAs整流器IC提供スキームに繋がっている。**
- ・ 本研究での知見をもとに企業とB5GへのWPTシステムの組み込み目的にてミリ波WPTの研究を開始。標準化を視野に入れて技術開発実施中。幅広い社会実装を狙っている。
- ・ **本研究での知見をもとに準ミリ波帯での社会実装に向けて新たな技術開発を開始。**
- ・ (課題) 社会実装時期は、大電力のマイクロ波電力伝送の標準化および制度整備における各方面と調整に依存

社会実装に向けた体制構築の状況

- ・ 電力伝送技術自体の確立は目標を達成する見込みであり、すでに複数の企業が興味を持っている。
- ・ (課題) 人体防護や既存通信システムに関わる法整備等の観点から市場が限定される可能性あり。

社会実装の実現可能性（マイクロ波帯WPTロードマップ）

マイクロ波ワイヤレス電力伝送の基盤技術開発 社会実装に向けた戦略

市場・ニーズの高まりに先行して
時間のかかる**基盤技術**を**産学連携**で
先行開発し我が国の**優位性確保**

SIP開始時
2018

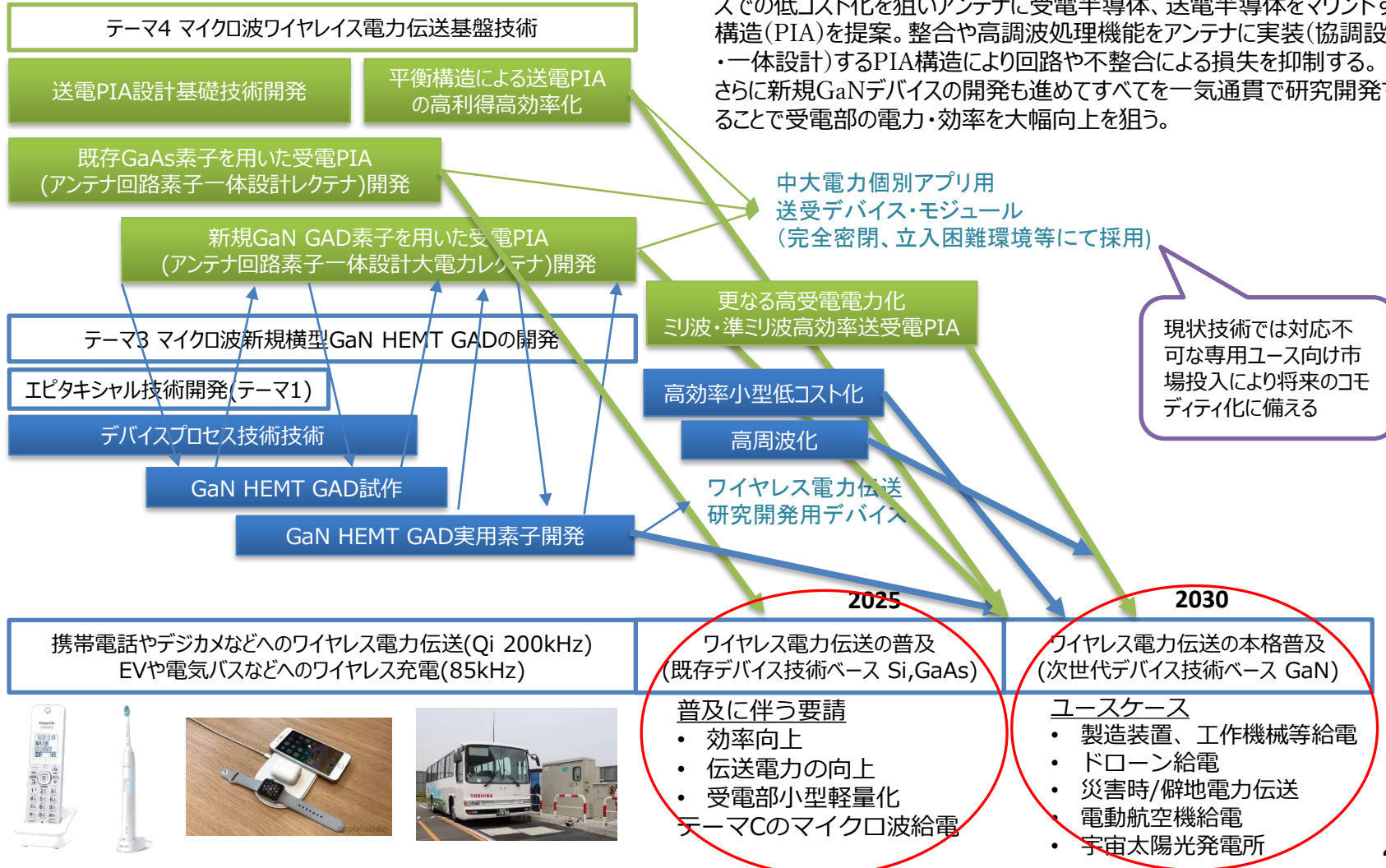
SIP終了時
2023

新コンセプト：

受電・送電モジュールともに、電力伝送効率の限界値追求、実用化フェーズでの低コスト化を狙いアンテナに受電半導体、送電半導体をマウントする構造(PIA)を提案。整合や高調波処理機能をアンテナに実装(協調設計・一体設計)するPIA構造により回路や不整合による損失を抑制する。さらに新規GaNデバイスの開発も進めてすべてを一気通貫で研究開発することで受電部の電力・効率を大幅向上を狙う。

SIP-IOE ワイヤレス電力伝送基盤技術

社会の状況



成果の対外的発信

取り組み方針

論文誌/国際会議への発表の他、セミナー、プレス発表等を積極的に実施する

主要な実績

- 受電レクテナのプレス発表（2020/9/23）日経新聞等、全国紙地方紙、TV局にて報道。
- MWEでの本テーマに特化したWorkshop開催（2020/11/26）
- 欧州マイクロ波国際会議にてPIAの提案と報告（2021/1）
- IEEEトップジャーナルにアンテナ、レクテナ論文掲載済

論文掲載(査読有りProceeding含む)15件、国際学会14件、国内学会58件