

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B) : IoE 共通基盤技術

(2) 研究テーマ(B) : IoE 共通基盤技術

1) 研究内容

再生可能エネルギーを組み合わせたエネルギーシステムを構築する共通基盤技術として、エネルギー変換に不可欠なユニバーサルスマートパワーモジュール (USPM)、それを可能とするコア・パワーモジュールおよび酸化ガリウムパワーデバイスに関する基盤技術開発と電力伝送の多様化に応えるエネルギー伝送システム、それを可能とする窒化ガリウム (GaN) パワーデバイスに関する基盤技術開発を行った。

- ・再生可能エネルギー等の不規則な変動電源にも常に高効率の対応が可能で、最新パワー半導体スイッチング素子の優れた特性を極限まで発揮でき、低コストで高い機能性、汎用性に富むUSPMの開発のため、①ワイドバンドギャップ(WBG)系半導体向け高速デジタルコントローラの開発、②高パワー密度、高温動作可能で①のデジタルコントローラに対応可能なパワーモジュールの開発、③WBG系半導体スイッチング素子として、炭化ケイ素(SiC)並みの低損失をシリコン(Si)程度のコストで実現する酸化ガリウムパワーMOSFET (電界効果トランジスタの一種)の開発を実施した。
- ・再生可能エネルギーを中心とするエネルギーシステムの電力ネットワークにおいて、多様な電源供給の要望に応え、かつ柔軟なエネルギーマネジメントの実現に寄与する電力伝送技術として、ワイヤレス電力伝送(WPT)システムの基盤技術を開発した。特に機器の小型・軽量化を可能とする高周波、すなわちMHz帯からマイクロ波帯の周波数を用いるワイヤレス電力伝送システムの実用化に必要なGaNパワーデバイスおよび回路システムについて要素技術の研究開発を行い、その機能実証を行った。MHz帯ワイヤレス電力伝送システム用のスイッチングデバイスはSiあるいはSiCのパワーデバイスでは実現が困難な高速スイッチング特性が必要であり、その高速性を実現するためにオン抵抗とゲート容量をバランスさせた縦型GaNデバイスとしてプレーナゲート型の縦型GaN MOSFETとトレンチ型ゲートの縦型GaN MOSFET構造を開発し、それぞれの特性を比較し縦型GaNパワーデバイスの適用指針を検討した。さらにMHz帯スイッチング回路に適用し、その高速スイッチング性能の実証を行った。マイクロ波帯ワイヤレス電力伝送システム用の重要な要素である受電システム用整流素子は高耐圧、高効率が求められ、その性能を実現するために横型GaN HEMTの構造を利用したゲーテッド・アノード・ダイオード(GAD)により10W級の整流素子を開発した。さらにマイクロ波帯電力伝送システムのレクテナへ適用し、受電システムとして機能実証を実施した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

2) 技術的目標

B-①(1) 超高速デジタル制御を有するノイズフリー-USPM とその応用技術の開発

- ・ アクティブゲートドライバの開発：設計試作した基板の基本性能評価（スイッチング周波数 2MHz 程度で動作）
- ・ ノイズフリーEMC フィルタの開発高周波アクティブノイズキャンセラの基礎検証
- ・ 瞬時デジタル駆動制御向け制御手法・ハードウェアの開発：設計試作した基板の基本性能評価
- ・ USPM のマスターコントローラとシステム応用技術開発：USPM 適用の一例として、蓄電装置応用を想定した USPM 機能の最適化完了

B-①(2) 高パワー密度、高温動作可能な WBG チップ搭載パワーモジュール

- ・ コア・パワーモジュールの全体設計、試作評価：高温動作 T_j 200°C対応（信頼性評価で問題なきこと）、パワー密度 150%以上（従来比）
- ・ 超高熱伝導・高信頼性回路基板の開発：絶縁耐圧 1200V 以上、耐ヒートサイクル性 500 cyc.、絶縁回路基盤の高放熱化（熱抵抗、従来比 70%低減）
- ・ 超高放熱冷却システムの開発：冷却システムの高放熱化（熱抵抗、従来比 35%低減）
- ・ チップ直接接合技術の開発：接合技術開発（200°C高温動作）、チップ下接合部の低熱抵抗化（熱抵抗、従来比 90%低減）
- ・ チップ表面電極技術の開発：チップ上配線技術開発（200°C高温動作）
- ・ モジュール/冷却装置接続技術および最適化設計技術の開発：モジュール/冷却装置間の低熱抵抗化（熱抵抗、従来比 35%低減）、接合温度 200°C以下、耐ヒートサイクル性 500 cyc.
- ・ GDU/デジタルコントローラとの接続親和性技術の開発：内部配線インダクタンスの機械特性と電気的特性の最適化設計による最小化（10nH 以下）

B-①(3) コランダム構造酸化ガリウムを用いたパワーMOSFET の開発

プレーナゲート構造縦型パワーMOSFET で以下の目標を達成する。

- ・ 耐圧：1,200V
- ・ 電流容量：10A
- ・ 特性オン抵抗：16m Ω cm²

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

【開発テーマ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

- ・ 低ゲート容量(対 SiC 1/2) MOS 実現 (600V/5A)

【開発テーマ2】MHz 帯電力伝送システム基盤技術の開発

- ・ MHz 帯電力伝送システムによる機能実証 (13.56MHz・7.7kW を実現する基

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

盤技術の機能実証)

【開発テーマ3】ワイヤレス電力伝送高周波デバイスの開発

- ・ワイヤレス電力伝送用 10W 化が可能な GaN 整流素子の実現

【開発テーマ4】マイクロ波帯電力伝送システム基盤技術の開発

- ・マイクロ波帯電力伝送システムによる機能実証 (5.8GHz・10W 級)

3) 課題目標の達成度

①国際競争力

USPM の研究開発は諸外国でも活発に進められており、技術確立に向け、研究開発が加速する見込みである。技術的な根拠を考慮したグローバルベンチマーク調査によって、我が国における要素技術の優位性だけでなく弱点についても確認し競争力強化につなげるべく、世界に先駆けた USPM の有効性の実証・技術確立による技術規格の策定や国際標準化の先導を目指した。

縦型 GaN MOSFET の技術的なグローバルベンチマークでは、比較対象の SiC デバイスに対して、オン抵抗とゲート容量の積によるスイッチング性能指数および特性オン抵抗について優位性を示し、高速スイッチングデバイスとして優れていることが示された。また、MHz 帯を用いたパワーエレクトロニクス技術およびワイヤレス電力伝送技術は、システムの小型化につながるものであり、電力伝送機器の小型・軽量化が望まれる EV 車両への超高効率・急速給電、ドローンへの急速充電等において期待される技術である。この技術の実用化には、MHz 以上の高速スイッチング可能なゲート駆動回路や同期整流技術が必要となるが、kW クラスの電力伝送をターゲットとしたこれら大容量かつ高速制御性を要する技術開発は前例がない。横型 GaN HEMT を用いた整流素子であるゲーテッド・アノード・ダイオード (GAD) に対するグローバルベンチマーク調査では、高出力化に必須の逆方向耐圧およびマイクロ波帯での電力特性において他の研究機関の整流用ダイオードに対して優勢性が示された。また、マイクロ波による放射型ワイヤレス電力伝送技術に関する検討は古くからなされているものの、大容量化に対する難易度が高く、限定的な応用に対して研究されているにすぎない。そのため大電力用途に最適化した実用的な整流素子やアンテナを含めた受電回路の開発は例が無い。本研究開発では、IoE 社会の新しいエネルギー伝送技術として MHz 帯からマイクロ波帯を利用する電力伝送システムを実用化するため、他に先がけてその基盤技術確立し国際競争力の確保を目指した。

本項目では、B-①(1)で開発した USPM と、B-①(3)で開発した USPM を構成する Ga₂O₃ デバイスについて、より詳細なグローバルベンチマーク調査を実施した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

B-①(1) 超高速デジタル制御を有するノイズフリー-USPM とその応用技術の開発 (SIP 終了時点)

| 評価軸 | 研究開発 | | | |
|---------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | SIP-USPM | PEBB(パワーエレクトロニクスビルディングブロック)(欧州) | IPM(インテリジェントパワーモジュール)(日本, 米国, 欧州) | PM(パワーモジュール)(日本, 米国, 欧州) |
| 電力変換効率 | ※1 ○→◎ (最適設計された回路よりは低効率) | ○ (最適設計された回路よりは低効率) | ◎ (最適設計可能) | ◎ (最適設計可能) |
| パワー密度 | ※2 ○→◎ (最適設計された回路よりは大型化) | ○ (回路分割により部品点数増加) | ◎ (最適設計可能) | ◎ (最適設計可能) |
| 制御性能 | ◎ (超高速コントローラ内包) | ○ (汎用マイコンを使用) | ○ (汎用マイコンを使用) | ○ (汎用マイコンを使用) |
| 汎用性 | ◎ (あらゆる変換器に対応) | △ (用途指向型) | △ (用途指向型) | × (用途毎に専用設計が必要) |
| メンテナンス性 | ◎ (故障USPMのみ交換で対応可) | △ (主回路交換のみ容易) | × (機器ごと交換) | × (機器ごと交換) |
| コスト | ◎ (構成要素全て量産対応可能) | ○ (主回路のみ量産対応) | △ (パワーモジュールのみ量産対応) | × (設計コスト大) |
| 市場性 | ◎ (部品のように扱可) | △ (用途, 仕様ごとに専用設計) | △ (用途, 仕様ごとに専用設計) | △ (用途, 仕様ごとに専用設計) |

※1 B-①(3)で開発中のGa2O3 GaNデバイスの適用によりUSPMの効率大幅向上

※2 B-①(3)で開発中のGa2O3 GaNデバイスの適用によりUSPMのパワー密度大幅向上

..... SIP-USPM — PEBB — IPM — PM — SIP-USPM(Ga2O3)

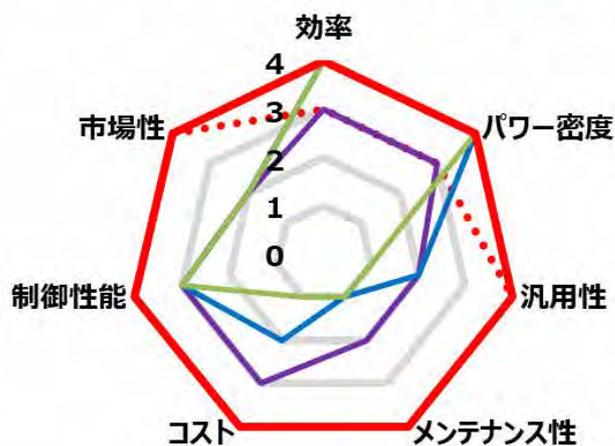


図 2-2-1 USPM のグローバルベンチマーク調査結果

- ・ USPM と競合する電力変換器のモジュール化技術として、パワーエレクトロニクスビルディングブロック (PEBB)、インテリジェントパワーモジュール (IPM)、パワーモジュール (PM) が挙げられる。
- ・ PEBB は主回路、IPM は半導体素子とゲートドライバ、PM は半導体素子をモ

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

ジュール化。USPM は主回路、ゲートドライバ、コントローラ、ノイズフィルタ等、電力変換器を構成する要素全てをモジュール化。

- ・ USPM の優位な点として、圧倒的な汎用性、メンテナンス性、スケールメリットによる低コスト化が挙げられる。その理由として、標準化された電力変換モジュールである USPM の組み合わせのみによって上位のあらゆる電力変換システムを構築可能であり、開発コストの劇的な削減、量産スピードの改善が見込める。PEBB、IPM、PM ではモジュール化対応している要素は一部に留まり、依然として高度な設計技術が要求される。そのため従来の電力変換器設計に大きく依存する。

【劣っている点 → 今後の戦略】

- ・ SIP 終了時においては、B-①(3)で開発中の Ga_2O_3 デバイスの適用により、USPM の効率、パワー密度は大幅に向上する。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

B-①(3) コランダム構造化ガリウムを用いたパワーMOSFETの開発 (SIP終了時点)

| 評価軸 | 研究開発 | | | |
|------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------|------------------|
| | SIP2期 α -Ga ₂ O ₃ (日本) | SIP1期 β -Ga ₂ O ₃ (日本、米国) | SiC (米国・欧州・日本) | 商用Si (欧州・日本) |
| バリガ性能指数 (Si比) | ◎ (6,726(推定)) | ○ (2,307) | △ (340) | × (1) |
| 損失 | ○ (高速ユニポーラ開発完) | ○ (高速ユニポーラ開発完) | ○ (高速ユニポーラ製品) | × (低速バイポーラ製品) |
| 放熱性 | ◎ (金属支持基板) | ○ (基板薄化) | ○ (SiC基板) | △ (Si基板) |
| 市場性 (必須) | ◎ (低価格で損失小さい) | ○ (価格・損失ともに中間) | ○ (高価だが損失小さい) | ○ (安価だが損失大きい) |
| コスト (必須) | ◎ (将来はSiなみ) | ○ (SiC基板の1/3を目指す) | △ (SiC基板が8インチ化) | ◎ (安価) |

— SIP2期 α -Ga₂O₃ — SIP 1期 β -Ga₂O₃ — SiC — 商用Si

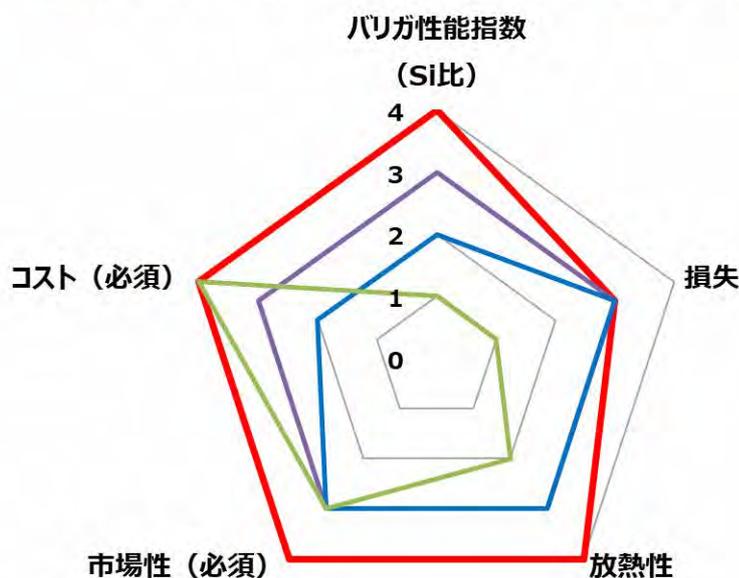


図 2-2-2 Ga₂O₃ デバイスのグローバルベンチマーク調査結果

SIP2 期で取り組んでいる α -Ga₂O₃ の競合となるパワー半導体材料としては、SIP1 期で取り組まれた β -Ga₂O₃、SiC、Si が挙げられる（複数の代表的国際会議や顧客からの情報）。

【優位な点】

・ バリガ性能指数

パワーデバイスの性能指標であるバリガ性能指数は下記の意味を持っている。

バリガ性能指数 (低周波) : オン抵抗 Ron のみを比較 → SiC の約 20 倍

バリガ性能指数 (高周波) : Ron*Qg を比較 (スイッチング特性も考慮) →

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

SiC の約 5 倍

バリガ性能指数が高いということは、開発が進むにつれて他の半導体材料では特性改善が頭打ちになっていくのに対して、さらに特性改善が進んでいくことを示しており、将来のポテンシャルの高さを示している。その際に重要なのは、酸化物半導体では実現が困難とされていた p 型層を用いて α -Ga₂O₃ の絶縁破壊電界の極限に迫るデバイス設計を可能にすることであり、本研究で取り組んだ MOS に最適な p 型層の開発はそのキーとなる技術である。p 型層が無ければ、ゲート絶縁膜の信頼性確保の観点から 3MV/cm 程度が上限となり、SiC・GaN なみの絶縁破壊電界強度しか出せず、移動度が低い分だけオン抵抗が高くなる。せっかくワイドバンドギャップで絶縁破壊電界が高い材料でも、p 型層が無ければその特性を十分に引き出すことができない。

・損失

本研究の最終目標を達成 (SiC なみの特性) することにより α -Ga₂O₃ は高速ユニポーラ開発完として 4 段階評価で「3」点とする。 β -Ga₂O₃ も高速ユニポーラ開発完として「3」点としている。これらの酸化ガリウムパワー素子はさらに特性改善して SiC を超える特性を実現する余地が残されており、それが実現すると「4」点となる。量産化までにさらに特性改善をはかり、SiC を超える低損失特性を実現する。

・放熱性

基板材料の熱抵抗から比較している。FLOSFIA では酸化物は熱抵抗が高いという弱みを持っていることに対して 2016 年から手を打ってきており、熱抵抗の高い α -Ga₂O₃ を 10 μ m 以下の極薄にして、SiC よりさらに熱抵抗が低く安価な金属支持基板に接合して放熱性を高めておりデバイス実証も完了している。先行する SBD の開発ではさらに低熱抵抗化に向けた技術開発も進めている。既に量産プロセスへの適用も実証済みであり完成度は高い。

β -Ga₂O₃ でも同様の問題を抱えており、熱抵抗の高い β -Ga₂O₃ を 100 μ m (α -Ga₂O₃ の 10 倍の厚さ) に薄化する手法とフリップチップ実装の方法を試みており「3」点とした (TECHNO-FRONTIER 2022 技術シンポジウム モータ技術シンポジウム B15 革新的パワーデバイス「 β -Ga₂O₃ パワーデバイス技術動向」2022 年 8 月 4 日)。SiC 基板と Si 基板はその熱抵抗から、それぞれ「3」点、「2」点とした。

・市場性

価格 (コスト) と損失から比較した。コランダム構造酸化ガリウム (α -Ga₂O₃) の特長) で比較したように、「超低損失」かつ「低コスト」であり

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

市場性はもっとも高く「4」点とした。独自アプローチで「SiC を超える性能を Si なみの低コストで作る」というビジネスモデルにより、小型電源から電気自動車、将来の電力連携まで広範囲に社会実装の促進を図っていく。競合材料は、一長一短があり「3」点とした。

・コスト

α -Ga₂O₃については、下記の理由により「4」点とした。

- i) 通電能力の高い α -Ga₂O₃によるチップ面積の小型化
(チャンネル移動度・バルク移動度の実測データからの試算では、現時点で SiC の 2 倍の電流密度が可能)
- ii) 照明用 GaN-LED 製造で大量に流通している安価なサファイア基板の利用
- iii) 真空を用いないミストドライ®法による安価なエピタキシャル装置を用いる (SiC 用エピ装置の数十分の一の価格)
- iv) さらに、特性向上によるさらなる小チップ化で基板・エピ費用を低減
大口径化・高歩留まり化によりプロセス費用の低減をはかることにより、Si なみのコストを実現する。最近、EV 市場の拡大に向けた 8 インチ基板での SiC パワーデバイス製造開始のアナウンスが相次いでおり、コスト低減が見込まれるが、 α -Ga₂O₃ はさらに優位を保つことが可能である。 β -Ga₂O₃ に関しては、バルク基板の価格は SiC の 1/3 を目指し α -Ga₂O₃ には低価格化では及ばないという報告 (TECHNO-FRONTIER 2022 技術シンポジウム モータ技術シンポジウム B15 革新的パワーデバイス「 β -Ga₂O₃ パワーデバイス技術動向」2022 年 8 月 4 日) があつたため、評価は α -Ga₂O₃ と SiC の中間の「3」点としている。

- ・超ワイドバンドギャップ (>4eV) 酸化物半導体パワーデバイスの事業化は未踏の領域であり、世界的に困難な技術課題に取り組んでいる。
- ・p 型伝導を可能した α -(Ir, Ga)₂O₃、 α -Ga₂O₃ MOSFET のノーマリオフ動作、 α -Ga₂O₃ 完全縦型 MOSFET の動作実証など多くが世界初の成果であり知財権の獲得に努めている。
- ・量産化までにさらに特性改善をはかり SiC を超える低損失特性を実現して損失の評点も「4」点を目指す。

【劣っている点 → 今後の戦略】

- ・コストについては、 α -Ga₂O₃ は照明用 LED の基板材料として安価に広く普及しているサファイア基板上に、非真空で安価にエピタキシャル成長が可能なミスト CVD 法で成膜することができるので、安価なパワーデバイスを実現できるポテンシャルを持っている。
- ・代表研究機関である(株)FLOSFIA が強い基本特許 (“もの”の特許) を取得

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

しており、幅広い特許網をグローバルに展開しているため、新規参入を阻止できている。

- ・ SIP2 期終了時では、現時点よりも損失低減が進み、市場性・コストともに最も高い評価となる。
- ・ 本研究で耐圧 1200V 級の縦型パワー MOSFET が開発され SiC に肩を並べる低損失が得られる。
- ・ コストは SIP2 期が終了して製品化に成功し量産規模が拡大する時点で Si に肩を並べる。最近、EV 市場の拡大に向けた 8 インチ基板での SiC パワーデバイス製造開始のアナウンスが相次いでおり、コスト低減と市場性の向上が見込まれるが、 α -Ga₂O₃ はさらに優位を保つことが可能である。
- ・ 上記の点により、SiC 並みの低損失を Si 程度のコストで実現するため高い市場性を有するようになる。

②研究成果で期待される波及効果

B-① エネルギー最適変換システムへの応用を見据えた基盤技術

図 2-9 に本 SIP による研究成果で期待される波及効果を示す。

- ・ USPM によって電力変換器の設計を極めて単純化可能である。
- ・ 大量生産によるスケールメリットが得られ、単価を劇的に低減できる。
- ・ 少ない設計リソースで数々の省エネ機器を生産可能になり、パワーエレクトロニクス機器のさらなる普及が期待できる。
- ・ 新 WBG デバイスの電気特性（高速スイッチングなど）を最大限活かすための低インダクタンスパッケージの開発により、パワーエレクトロニクス装置の高効率（省エネ）、小型化に貢献する。
- ・ 超高速デジタル制御と低価格化が期待される Ga₂O₃ チップを搭載可能とする高パワー密度、高温動作可能なコア・パワーモジュール (Layer1) を開発し、ユニバーサル性とスマート性を両立させた USPM に組み合わせることで、IoE 社会でのエネルギー変換のイノベーションを創出し、パワーエレクトロニクス装置の開発効率の向上にも寄与する。
- ・ 制御性の向上を目指した低インダクタンスパワーモジュールの開発により、センシング遅延が低減され、モジュール間の特性ばらつきを補償するリアルタイムオートチューニング (自動制御) 機能が実現する。これにより、自動車、サーバ/インフラ、産業機器、等の電力の高効率化と長期信頼性を更に高め、我が国の産業基盤の強化に貢献する。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

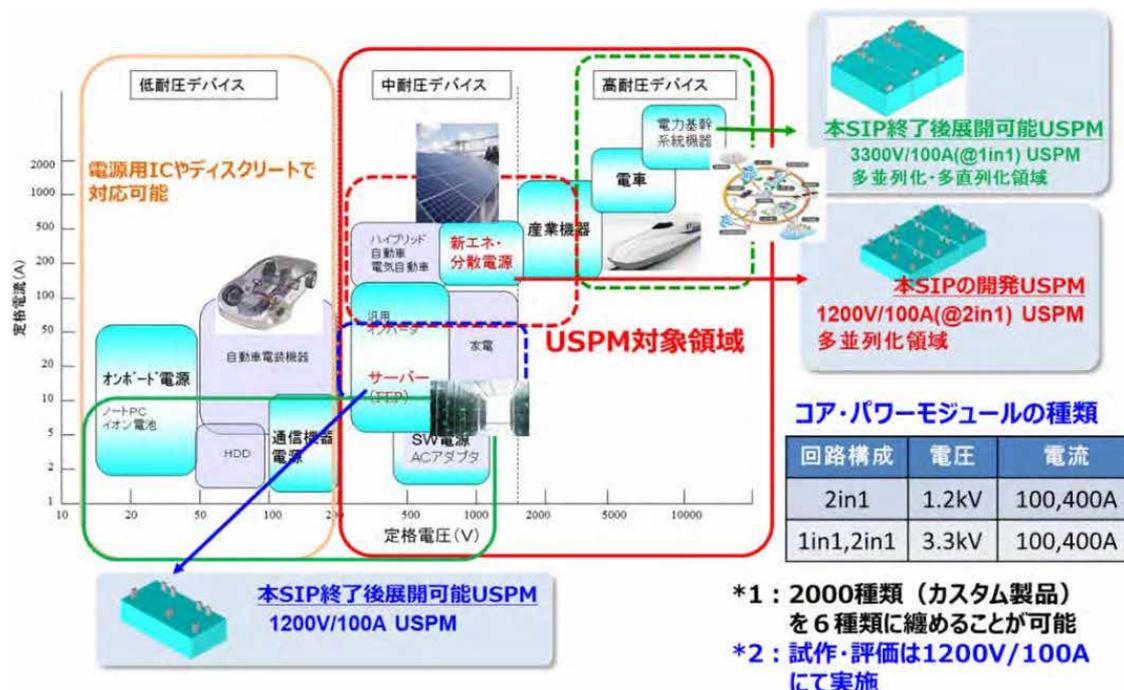


図 2-2-3 USPM の開発により期待される波及効果

- ・ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (5.3eV) は、SiC (3.3eV)、GaN (3.4eV) を超える超ワイドバンドギャップ（バンドギャップ 4eV 以上）の酸化物半導体で初めてのパワーデバイス事業化が見込まれる。酸化物半導体では実現困難とされてきた p 型伝導層を用いた縦型高耐圧パワーMOSFET を実現することにより、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の材料特性を最大限に引き出す低損失特性が得られる。これまで酸化物半導体 ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) では p 型伝導層が実現できないためにトレンチ MOS 構造による電界緩和技術等が試作に用いられてきたが、絶縁膜の信頼性は 3MV/cm 程度までしか確保できないため、SiC や GaN 程度の絶縁破壊電界強度までしか上げることができず、本来の材料特性を引き出すことはできなかった。また、伝導する p 型層を使えば、高速スイッチングの際に発生する正孔を p 型伝導層から素子外に排出することができるので、GaN で課題となっているようなダイナミックアバランシェ破壊を防止することも可能となり、高速スイッチング動作が可能となる。
- ・ 脱炭素社会におけるエネルギーネットワークの構築に不可欠な再生可能エネルギー等の不規則な入力電力に対しても常に高効率に変換できる USPM は、電力消費ニーズが多様化する Society 5.0 において、不可欠な技術システムの確立という観点で重要である。
- ・ 本研究開発で取り組んできた「WBG 系半導体スイッチング素子として SiC 並みの低損失を Si 程度のコストで実現する MOSFET の開発」は、既存の Si パ

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

ワースト半導体を用いるよりも高効率・小型の電力変換器を安価に実現する上でのコア技術であり、多様化する電力消費ニーズに広く対応して早期の社会実装が進むと期待される。さらに SIP 第 2 期終了後の開発では、特性改善により SiC を超える低損失を実現できることが期待されており、試算では特性オン抵抗が 1/2 以下になるとされている。

- ・例えば、再生可能エネルギー分野や産業機械、EV、家電製品等のインバータなどに USPM を搭載することで、2030 年において世界で 1.3 兆円程度の市場効果及び年間 1700 万トン以上の CO2 削減効果 (EV に搭載される WBG 系半導体を用いた IPM による改善効率 10%等) が見込まれる。

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

- ・ Society5.0 社会においてはスマートフォンに代表される小型モバイル機器の一般化に続き、産業機器の自動化とスマート化、交通インフラであるモビリティ車両の EV 化および自動化技術の進展が期待されている。機器の自動化やスマート化は産業機器やモビリティ車両にとどまらず、IoT 社会のあらゆるセンサ、あるいは身の回りの機器に共通するニーズであり、その電源においても自動で充電されるなど利便性の高い電源環境が望まれている。この電源環境は IoE 社会の総合的なエネルギーシステムの一つの領域を構成するものであり、高効率かつ小型のパワーエレクトロニクスデバイスおよびそれを使用したパワーエレクトロニクスシステムが必要となる。
- ・ 縦型 GaN デバイスは、他の半導体材料によるパワーデバイスに比べ高速のスイッチング動作が可能であり、この特性によりパワーエレクトロニクス回路の小型化を可能にする。また、GaN のウェハ製造技術、縦型 GaN デバイスの製造技術において日本は技術優位性を有する。このことから本テーマで得られた成果は、GaN のウェハビジネス、GaN パワーデバイス、それらを基盤とする小型パワーエレクトロニクス回路・システムの産業化等、その波及効果が期待される。
- ・ MHz 帯を用いた非放射型電力伝送システム (13.56MHz) は GaN の高速スイッチング性能を必要とする応用分野であり、その MHz 帯ワイヤレス電力伝送により利便性を高めることが期待される家電機器、電気自動車、産業用搬送機器等、多様な分野へ広がり得る技術である。特に脱炭素社会実現に向けた電力分野での再生可能エネルギーの導入において、電力供給安定化のための蓄電機能として電気自動車に搭載される蓄電池の活用が検討されており、再生可能エネルギーシステムと系統を接続するパワーコントロールシステムや、電力の需給バランスを平準化するために電気自動車の搭載電池を系統に連系する際のパワーコントロールシステムなど、エネルギーセクター

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

と交通セクターをつなぐ電力変換システムでの社会実装において有用となる。

- ・横型 GaN 整流デバイスは、マイクロ波帯の整流素子として高効率性と高耐圧性による大電力化が期待できる。また、マイクロ波帯の電波は MHz 帯の電波に比べ直進性を高めることができ放射方向を制御することが可能なため、我が国の得意とする工作機械や産業機器など可動部や移動機器への電力供給の大電力化に寄与しうる。これら機器のケーブルをワイヤレス化することで、断線による不測の装置停止や配線設備の保守・点検などから解放される大きな効果が見込まれる。
- ・マイクロ波帯を用いた放射型電力伝送システム (5.8GHz) は、上記の整流素子の利点を活かした応用システムであり、災害時の可搬型電力供給装置はもとより、IoT 社会のセンサや小型モバイル機器での電池切れを防止する自動給電、産業機器の自動化、物流機器、ドローンの航続時間の飛躍的拡大、種々の社会インフラ維持コスト抑制につながるドローンによるインフラ点検の自動化・効率化などをもたらし、様々な社会的な効果への波及が期待できる。

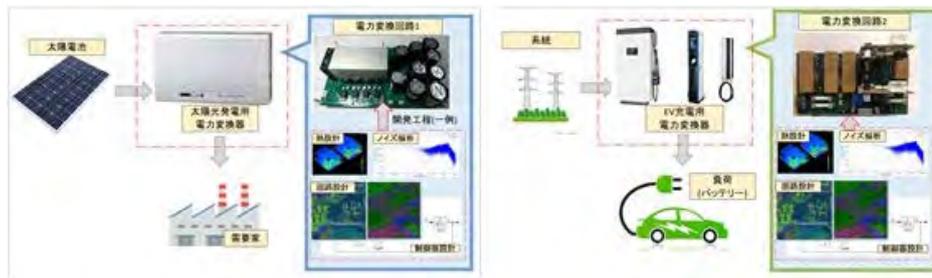
③達成度 (1)： SIP 第 2 期 5 年間の設定目標に対する達成度

B-① エネルギー最適変換システムへの応用を見据えた基盤技術

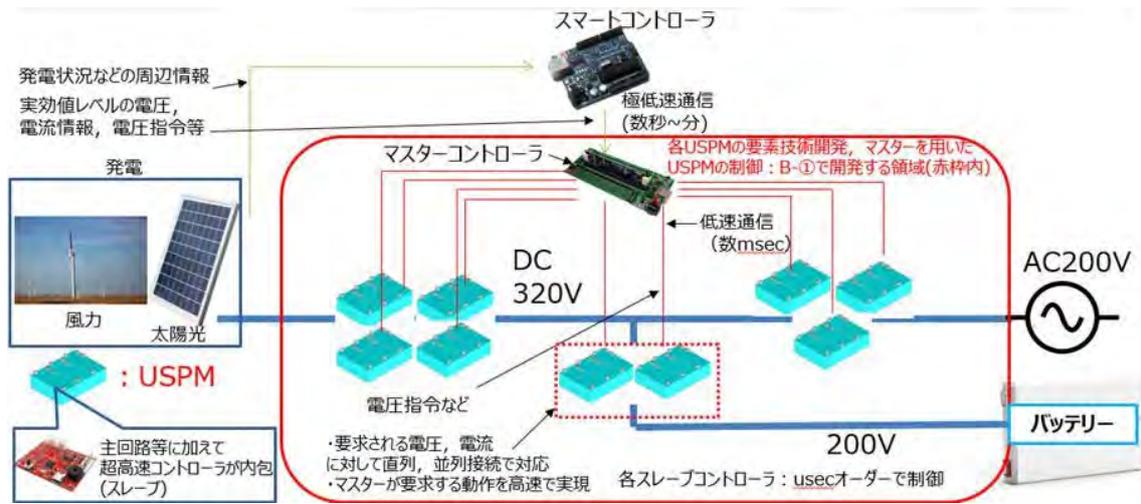
(1) 超高速デジタル制御を有するノイズフリー-USPM とその応用技術の開発 (B-①(1))

- ・図 2-2-4 に USPM の概要を示す。従来の電力変換器は回路設計やノイズフィルタ設計などに多数のノウハウが必要となる。その結果、開発納期の長期化や設計コスト増加を招き、国際競争力を低下させる。
- ・図 2-2-5 に電力変換器の開発のフローを示す。USPM(ユニバーサルスマートパワーモジュール)を用いた電力変換システムでは、高度に集積化された電力変換モジュールである USPM の使用数、および接続方式のみで従来における電力変換システムの設計を完了させる。これによりノウハウや高度な設計技能を有さなくてもパワーエレクトロニクス機器の開発が可能となる。さらに開発における試行錯誤のフェーズが劇的に減少することで開発期間を大幅に短縮できる。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術



従来の電力変換器設計：アプリケーション毎に専用設計が必要



USPM：アプリケーションに関わらずあらゆる電力変換器を実現可能

図 2-2-4 USPM 概要

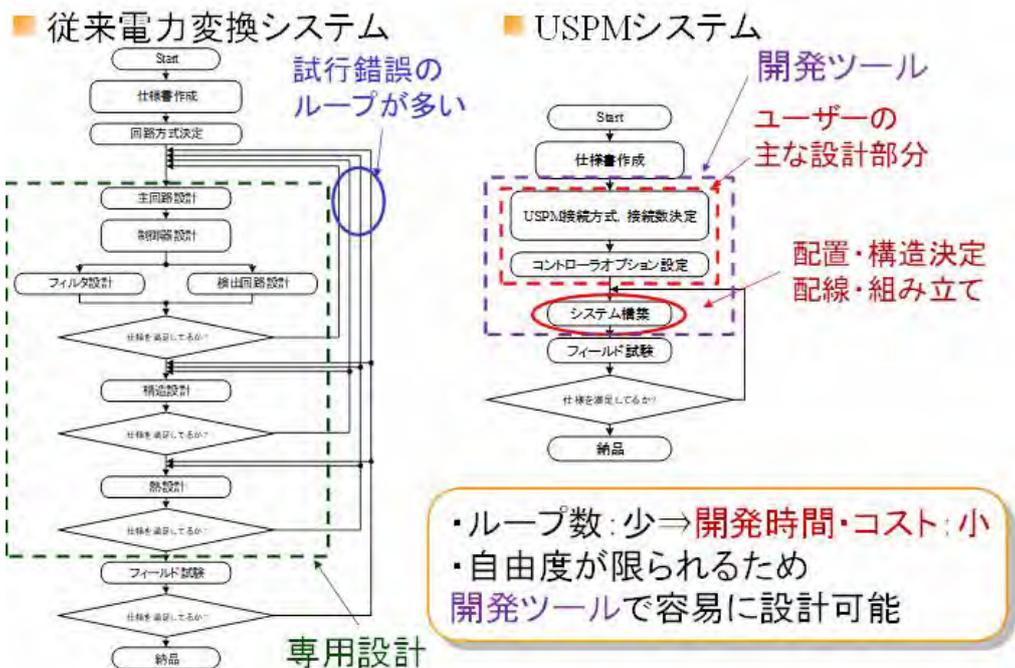


図 2-2-5 従来の電力変換システムと USPM システムの開発フロー

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 1】 ノイズフリーEMC フィルタの開発 (USPM のノイズレス化技術の開発)

【達成目標】 多数台の USPM に対して、フィルタの最適設計を行い、スイッチング周波数 2MHz に対応するアクティブキャンセラ技術を確立する。

- ・本項目では、LC フィルタに小容量のアクティブ回路を追加することによって低周波域から数 MHz までの帯域のノイズ低減可能な技術を確立した。DC 配置の PCC を開発し、さらに小型化が可能であることを確認した。
- ・図 2-2-6 に L 型のパッシブフィルタに CM トランスを必要としないアクティブ回路を組み合わせた、提案ハイブリッドフィルタの回路図とノイズ測定結果を示す。提案するハイブリッドフィルタはフィルタ全体の体積・重量をほとんど増加させることなく、従来は対策が難しかった 150kHz 以上の低周波領域の CM ノイズの抑制を実現可能である。直流 350 V の電源で駆動される電動コンプレッサを用いた実験により、150kHz～4MHz 程度の周波数帯域において、伝導性 EMI を 12 dB 程度低減できることを確認した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

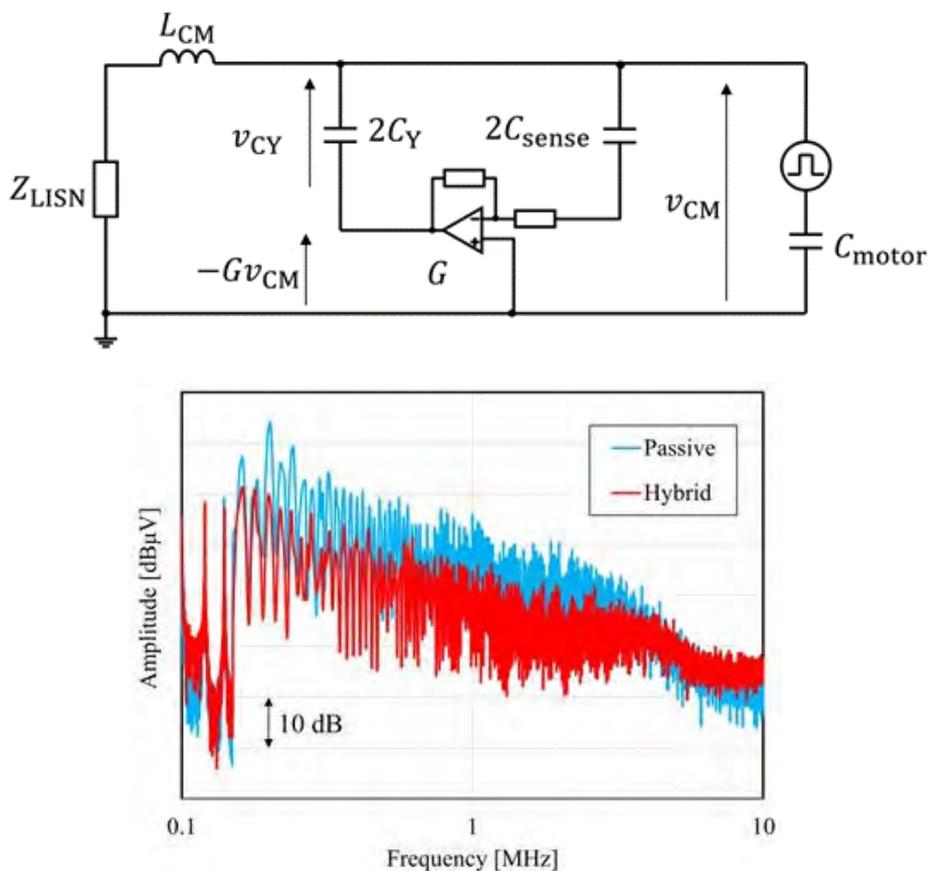


図 2-2-6 L 型ハイブリッドフィルタ（上図）とノイズ測定結果（下図、
 150kHz～4MHz までハイブリッドフィルタが 12 dB 程度抑制（ノイズ量
 1/4）

- ・ 図 2-2-7 に、 π 型 CM フィルタとアクティブ回路を組み合わせた提案ハイブリッド EMI フィルタの回路図とノイズ測定結果を示す。安定性解析の結果から、ハイブリッド EMI フィルタが電源システムのインピーダンス変動や寄生成分の影響を受けても安定動作することを確認した。発振器と高周波アンプを CM 電圧源とする簡易的なエミッション試験を行い、150 kHz～30 MHz の周波数帯域においてハイブリッド EMI フィルタが同じ受動素子を用いたパッシブ EMI フィルタよりも減衰特性が 5～15 dB 向上することを確認した。また、ハイブリッド EMI フィルタに小型の CM チョークを併用することで、更に特性が向上することも明らかにした。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

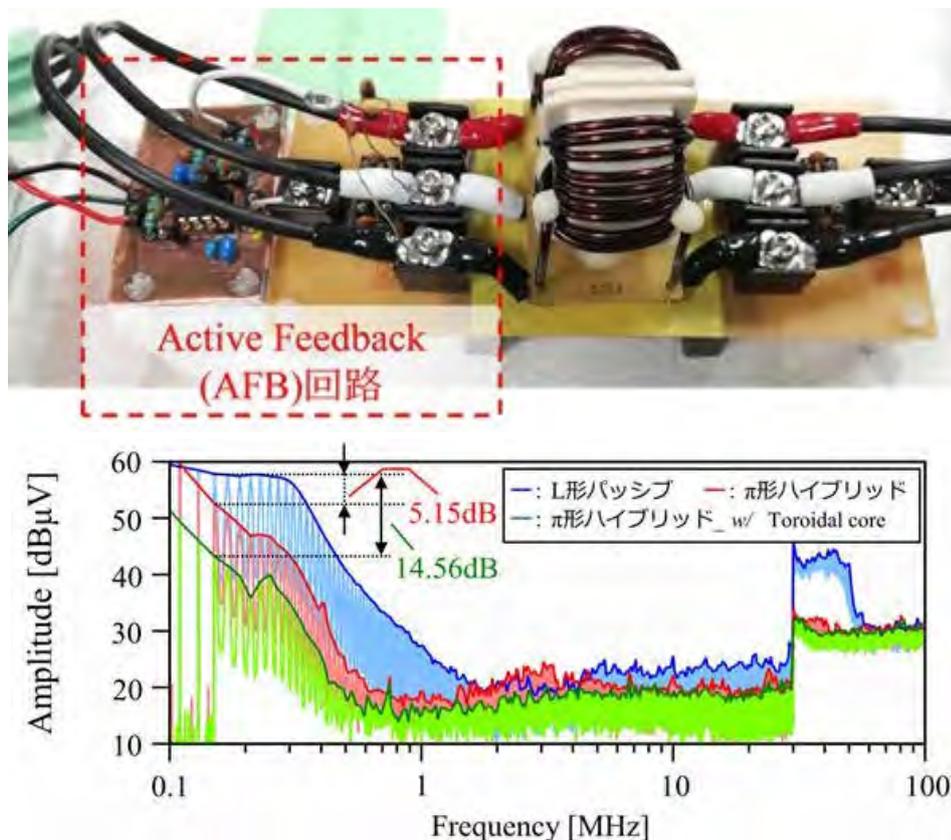


図 2-2-7 試作π型ハイブリッド EMI フィルタの外観図（上図）とノイズ測定結果（下図、150 kHz で 5.15 dB、200 kHz～1 MHz にかけて 10～15 dB 程度の低減）

・従来の AC 側配置の PCC に比べ、PCC の小型軽量化が可能である DC 側配置の PCC を検討した。これは、AC 出力電圧が最大で、力率を最大の 1 と仮定しても、インバータ DC 入力側を流れる総電流はインバータ AC 出力側を流れる総電流に対して最大でも 82%しか流れないため、CM トランスの窓面積を小さくできるからである。さらに、AC 出力電圧や力率が低下した場合にはインバータ DC 入力側を流れる総電流はさらに小さくなるため、DC 側配置の PCC は AC 側配置の PCC と比較して銅損の低下も見込むことができる。CM トランスの重量・体積を最小化する最適設計法を確立し、電圧形 PWM インバータを用いた実験により CM 電圧抑制効果を検証した。図 2-2-8 に試作した DC 側配置の PCC と CM 電圧の周波数解析結果を示す。DC 側配置の PCC の場合ではスイッチング周波数 100 kHz 以上の広い周波数領域において、最大で 40～50 dB 程度の CM 電圧低減効果があることを確認した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

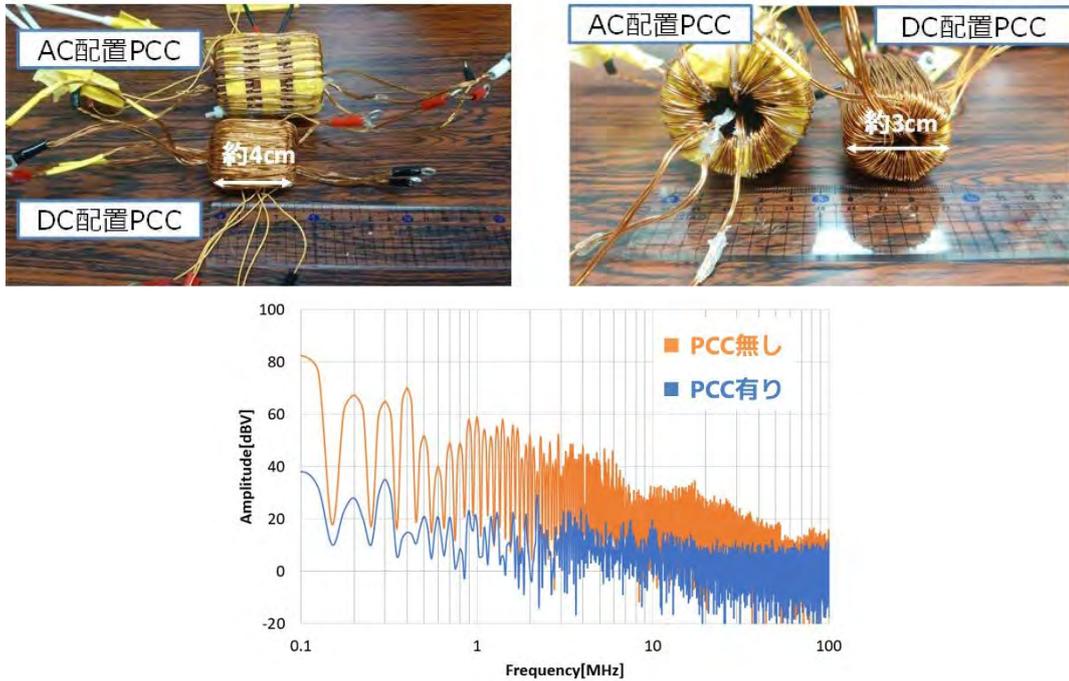


図 2-2-8 試作した DC 配置 PCC による CM 電圧の抑制効果

- ・コンデンサに流れる高周波電流と等価直列抵抗 (ESR)、等価直列インダクタンス (ESL) によって発生する高周波電圧による DM ノイズを低減, DM フィルタを小型化可能なたすきがけコンデンサバンクを検討した。図 2-2-9 に等価回路と実験結果を示す。DC リンク側のリップル電圧を広帯域で平均 15dB 低減できることを確認した。

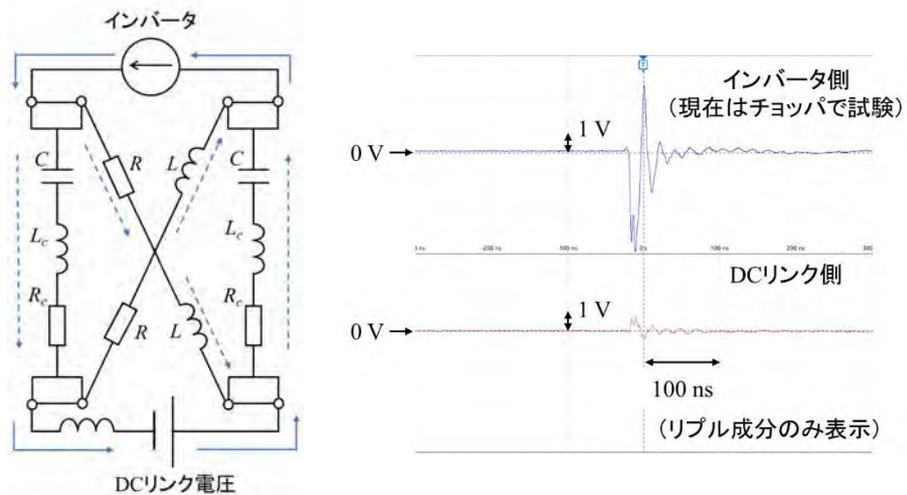


図 2-2-9 たすきがけコンデンサバンク (左図) とチョップパ試験による実験結果 (右図、インバータ側で発生する高周波電圧が DC リンク側では抑制されている)

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 2】 アクティブゲートドライバの開発(アクティブゲートドライバの最適設計、実装技術の開発)

【達成目標】 高機能 USPM コントローラを用いた SiC MOSFET のデジタルアクティブゲート駆動

- ・本研究開発において共同開発された USPM コントローラを用い、SiC MOSFET (1200V, 10A) のデジタルアクティブゲート駆動が実現できることを確認すると共に、瞬時デジタル駆動制御に向けて制御手法とハードウェアの開発を行った。
- ・USPM コントローラにより、デジタルアクティブゲート駆動による SiC MOSFET のスイッチング制御を実現し、スイッチング時のミラー効果の抑制、サージ電圧・電流の抑制が可能であることを示した。これらのデジタル制御信号を GA 等の最適化アルゴリズムにより絞り込むことが可能であることを示した。これにより、デバイスの変更や負荷の変化でアナログ回路の調整が難しかったゲートドライブを、ソフトウェアで再調整できることを明らかにした。
- ・デジタルアクティブゲート駆動をスイッチングサージ電圧およびスイッチング損失のトレードオフを考慮して行うことができるゲート駆動波形を決定する方法に関して検討を加え、コントローラ FPGA において多目的最適手法を適用できることを確認すると同時に、波形選択ツールを提案した。
- ・図 2-2-10 および図 2-2-11 に提案するデジタルアクティブゲートドライバの実験結果を示す。デバイス特性/電力変換回路の条件に合わせたゲート駆動波形の決定方法に関して検討を加え、デジタルアクティブゲート駆動方式を適用したコンバータの動作において、異なる駆動条件においてもサージ電圧を低減できることを示した。またその低減率は、キャパシタを用いたスナバ回路 (35.9%) よりも優れる (86.3%) 特性となり、デジタルアクティブゲートドライブの効果が明らかとなった。
- ・USPM によるデジタルアクティブゲート駆動の汎用化だけでなく、最適なスイッチング条件への制御が可能であることを示した。
- ・【2022 年 10 月時点見込み】 高機能 USPM コントローラの適用によるコンバータ駆動条件に合わせたゲート波形の自動最適化を実施する。図 2-2-12 と図 2-2-13 に最適化のフローと実験回路を示す。また、ダブルパルス試験で検証したアルゴリズムをコンバータ駆動に改良し、USPM コントローラの高速・高機能モジュールとしての性能を生かしたデジタルフィードバック制御を検証する。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

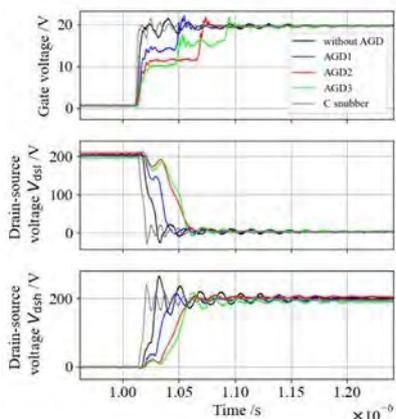


図 2-2-10 最適ゲート駆動波形とスイッチング

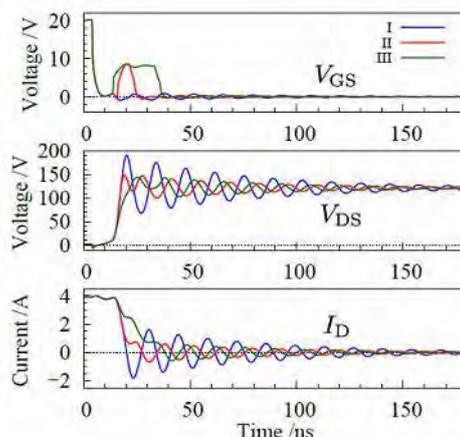


図 2-2-11 駆動条件に伴う特性比較

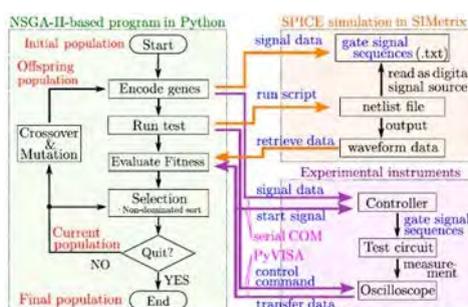


図 2-2-12 シミュレーション及び実験による最適化フロー最適ゲート駆動波形とスイッチング

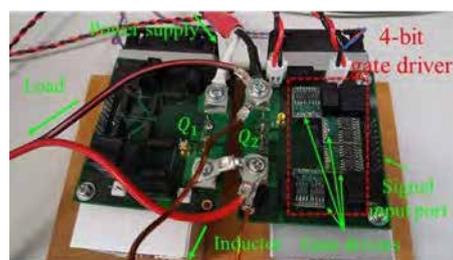


図 2-2-13 ダブルパルス試験検証系へのデジタルアクティブゲート駆動の実装

【実施項目 3】 瞬時デジタル駆動制御向け制御手法・ハードウェアの開発
 (FPGA コントローラ技術の開発および USPM 用制御手法の開発)
【達成目標】 コントローラ試作基板 Rev.2 の製作、動作確認、基板 rev.2 を用いた USPM モジュールの製作、さらにその USPM モジュールを 3 個用いた PV システムの製作とシステム動作検証、基板 Rev.1 による高速デジタル制御の制御特性検証、コントローラ間での通信制御動作検証。

・USPM コントローラを用いた 50MHz 高速サンプリングデジタル制御により、モータドライブシステムおよび系統連系システムでの制御系のロバスト性向上を実験的に確認し、論文発表を行なった。図 2-2-14 に実験結果を示す。2021 年度末に開発を行なった EtherCAT、CAN、Wireless wifi の 3 種類の通信プロトコルによるコントローラ間での通信動作確認を完了した。USPM 検証用の PV システムの製作を行い、そのシステム検証を実施中

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

である(2022年10月時点)。2022年度末までに、USPM 検証用の PV システムおよび蓄電装置システムの動作検証を行い(図 2-2-15、図 2-2-16)、USPM を組み合わせることで、高性能なパワエレシステムの構築が簡易かつ短期間に実現できる事を実証する。

- ①電流制御(ACR)を適用し、系統電力の位相に同期した定格相当の電流値が出力されていることを確認
 ②高速フィードバックと高速デジタル演算を制御系適用し、十分な速応性や追従性があることを確認

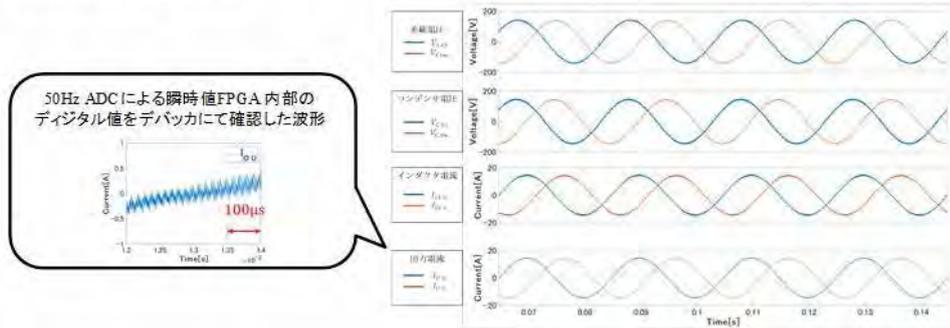


図 2-2-14 USPM コントローラによる制御性能改善

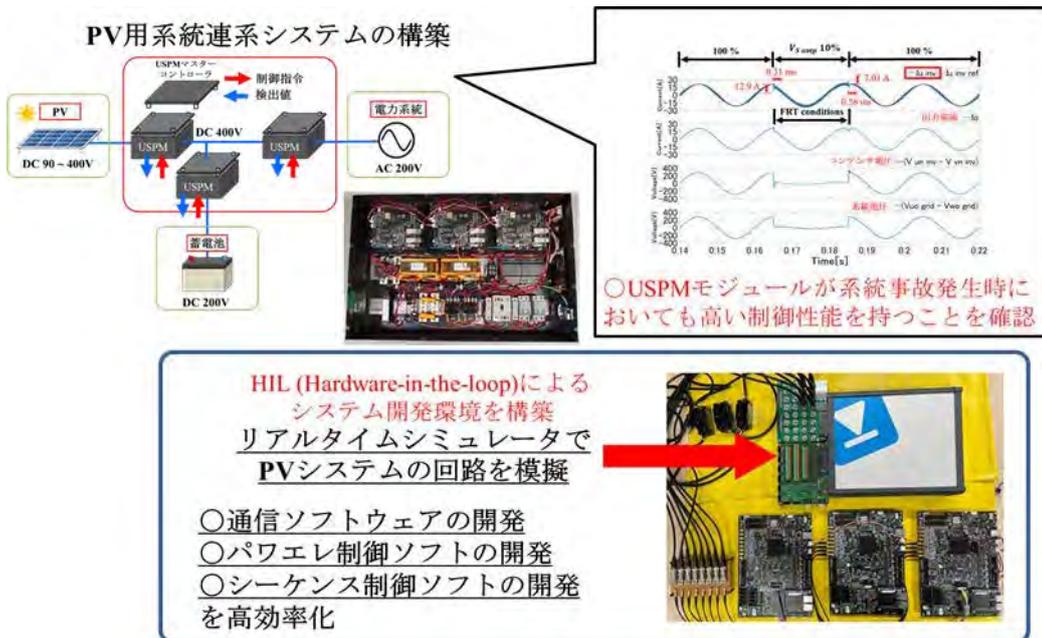


図 2-2-15 USPM コントローラによる PV 系統連系システム

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

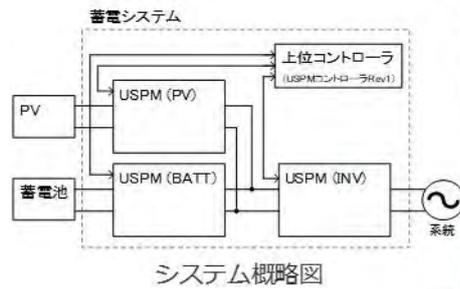


図 2-2-16 USPM による蓄電装置システム

- ・ USPM コントローラを用いた高速サンプリングデジタル制御により、モータドライブシステムのロバスト性(モータの長時間連続運転や経年劣化による特性変化に対する適応性)が向上することを実機実験で確認した。従来制御に比べて、USPM コントローラを用いた制御では、モータの磁束成分とトルク成分の立ち上がりにおいて、良好な結果が得られた。(図 2-2-17)

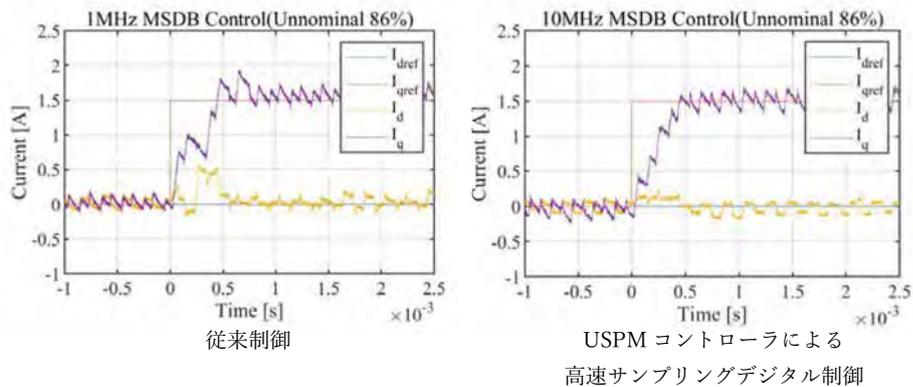


図 2-2-17 USPM によるロバスト性向上

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

**【実施項目 4】 USPM のマスターコントローラとシステム応用技術開発
(USPM のスイッチングタイミングを制御する並列化技術の開発)**

【達成目標】 タイミング制御回路の各 USPM への分散配置を実現し、電流極性の変化を伴うインバータ回路へ適用可能なタイミング制御回路を開発する。

- ・ 多並列接続した電力変換器において発生する横流を抑制するためにこれまでに半導体スイッチのスイッチングタイミングを制御する手法を提案してきた。しかし、このような電流バランス制御を行った場合においても、制御の過渡状態で発生する横流を抑制するために結合インダクタが必要である。そこで、横流を抑制する結合インダクタ回路を提案した(図 2-2-18)。提案回路は各変換器出力に結合インダクタを接続し、結合インダクタの二次巻線にアンプ回路を用いて結合点電流に比例した電流を流すことで、横流成分に対してのみ磁束を作るインダクタとして動作し、小型のコアを用いて構成可能である。また、並列接続数によらず設計することが可能で、モジュール化に適した方法でもある。さらに、アンプ回路の出力電流を検出することで、提案の結合インダクタ回路内で使用する DC-CT の周波数帯域を上回る周波数帯域で電流検出することができる。試験回路による実験により、横流の抑制効果と電流検出動作を確認し、提案の結合インダクタ回路の妥当性・有用性を確認した。
- ・ 開発したハーフブリッジモジュールを用いることで実験装置の立ち上げが迅速になり、以下の実験が迅速にできることを確認した。
 - i) 複数並列接続したハーフブリッジモジュールに既に確立したスイッチングタイミング制御を導入し、30 kW 三相デュアルアクティブブリッジコンバータを実現
 - ii) 定電力負荷の不安定現象を抑制する直流配電システムの電圧安定化装置

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

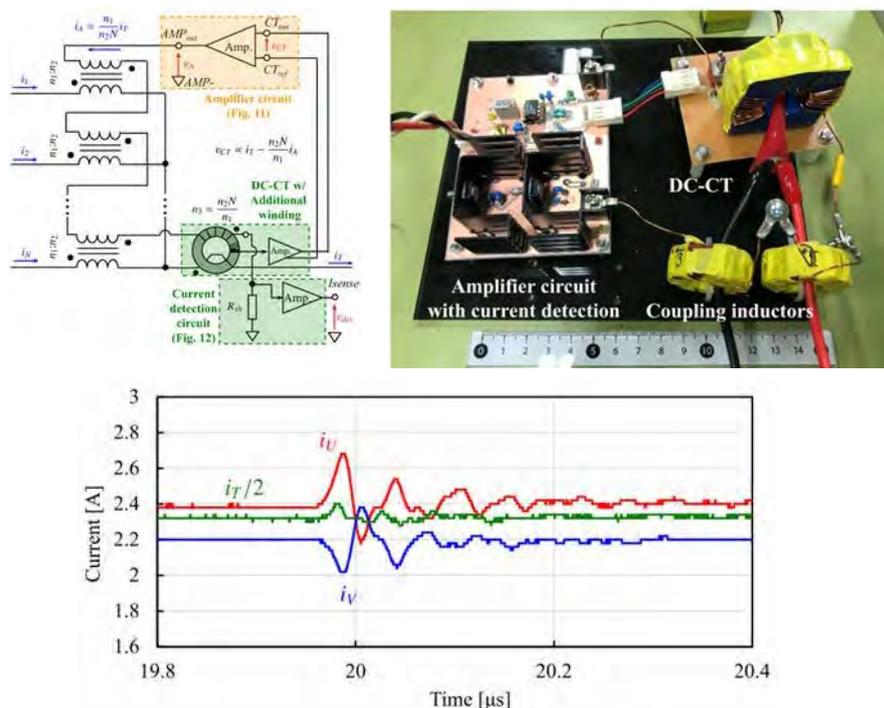


図 2-2-18 提案した結合インダクタ回路の構成及び試作したインダクタ回路（上図）と二並列チョップパ試験による実験結果（スイッチング時の拡大波形）

- ・ さらに高精度なスイッチングタイミング制御を実現するために制御時間分解能の向上を検討した。クロック周波数を 300 MHz から 800 MHz に上げることで制御時間分解能を 3.3 ns から 1.25 ns にすることができ、三並列チョップパを用いた実験を行い、より高精度なスイッチングタイミング制御ができることを確認した。

【実施項目 5】USPM のマスターコントローラとシステム応用技術開発 (USPM の昇降圧ユニバーサルマトリックスコンバータへの応用技術の開発)
【達成目標】蓄電装置応用を想定した USPM 機能の最適化

- ・ 各レイヤで開発した要素技術をまとめ、USPM 試作機、およびマスターコントローラの設計、開発を行った。これらを統合した蓄電装置を開発し、実機実験によりその動作を確認できた(図 2-2-19)。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

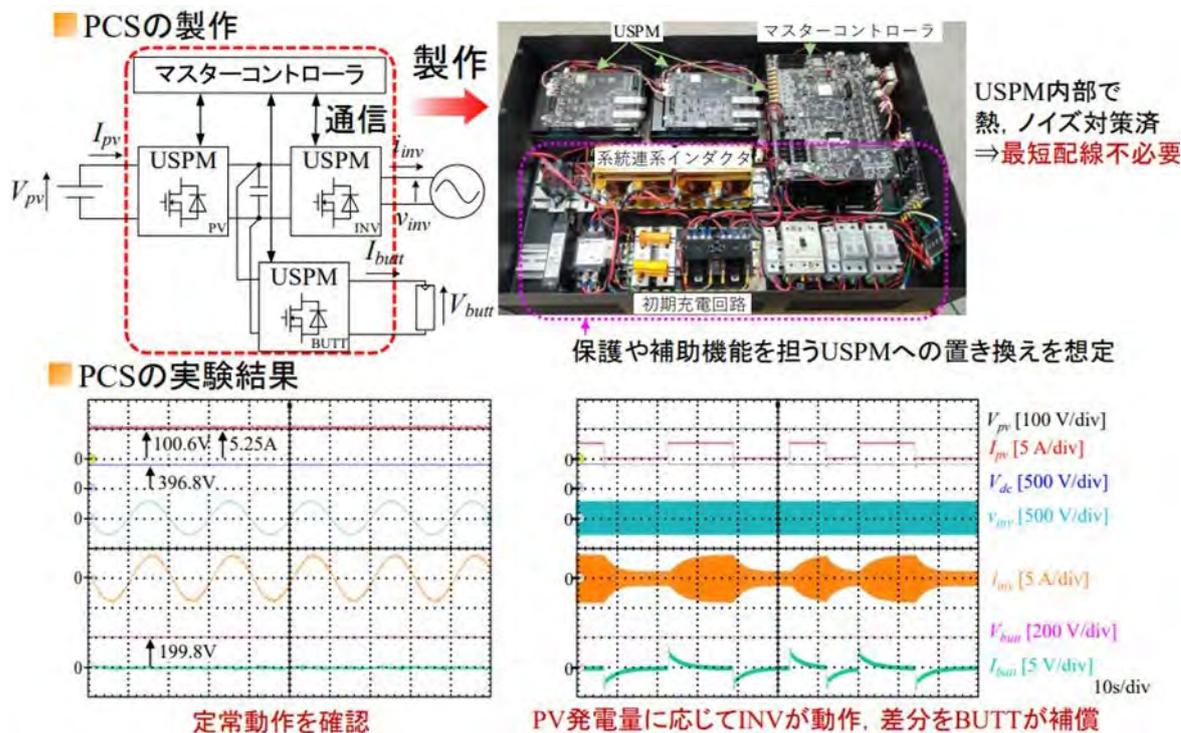


図 2-2-19 USPM による蓄電装置システムの実験結果

【実施項目 6】USPM のマスターコントローラとシステム応用技術開発
 (USPM の MMC への応用技術の開発)
 【達成目標】無線通信を用いた USPM の三相 MMC への応用技術開発と実機検証。

- ・ USPM を用いた三相 MMC においてコントローラ間の信号送受信を無線通信とした場合にも安定動作を実現するために、各モジュールのコンデンサ電圧に応じた自律的な指令値可変手法を提案した(図 2-2-20)。提案手法は USPM を模擬した実機により実験検証を行い、有効性を確認した。実験結果より、モジュールのコンデンサ電圧のばらつきは提案手法の適用により 80%抑制され、出力電圧の THD は 1%以下に抑制された。また、無線通信において懸念される断続的なパケットロス発生時にも同程度のシステム性能が得られることも確認した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

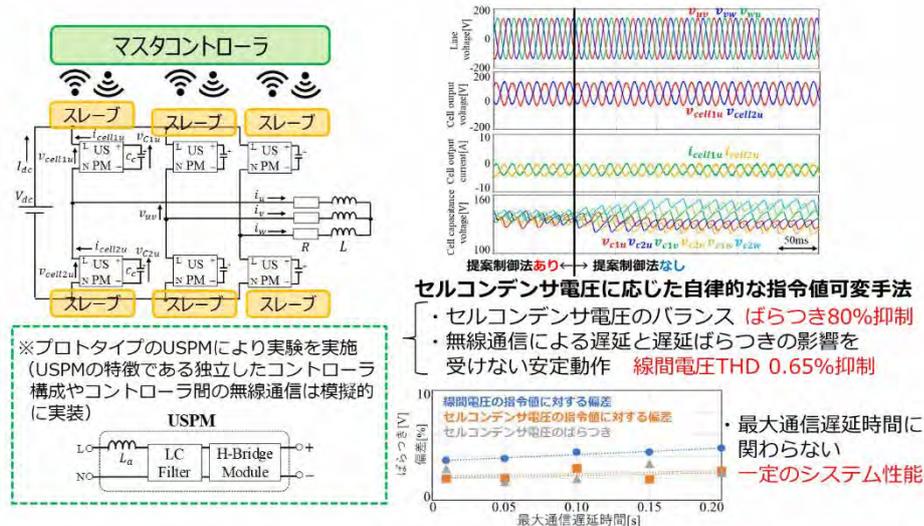


図 2-2-20 USPM を用いた三相 MMC の実験結果

【実施項目 7】 USPM のマスターコントローラとシステム応用技術開発 (USPM の自動車向け応用技術の開発)

【達成目標】 USPM を電動車両に適用する場合の基本仕様例を示す。また、要素技術毎の適用効果についても具体例を提示する。

・USPM の電動車両の適用検討について、2021 年度までにモータインバータ、補機用 DCDC コンバータ、オンボードチャージャーを候補として選定した。2022 年度は、さらに検討を進めて、具体的な USPM の仕様案を提示した。多種多様な電気自動車の普及拡大に伴い、モータ駆動システムの電圧とモータ出力の範囲も拡大している。USPM を適用する場合には、システム電圧毎 (100V, 400V, 800V など) に USPM を用意し、本プロジェクトの研究成果である並列化技術を応用して USPM を並列化することで広範な電圧-出力帯をカバーすることが適切と考える。図 2-2-21 に主な電気自動車のシステム電圧-モータ出力範囲と USPM 構成の一案を示す。①~④の 4 種類の USPM を用意することで大半の電気自動車の要求をカバーできることになる。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

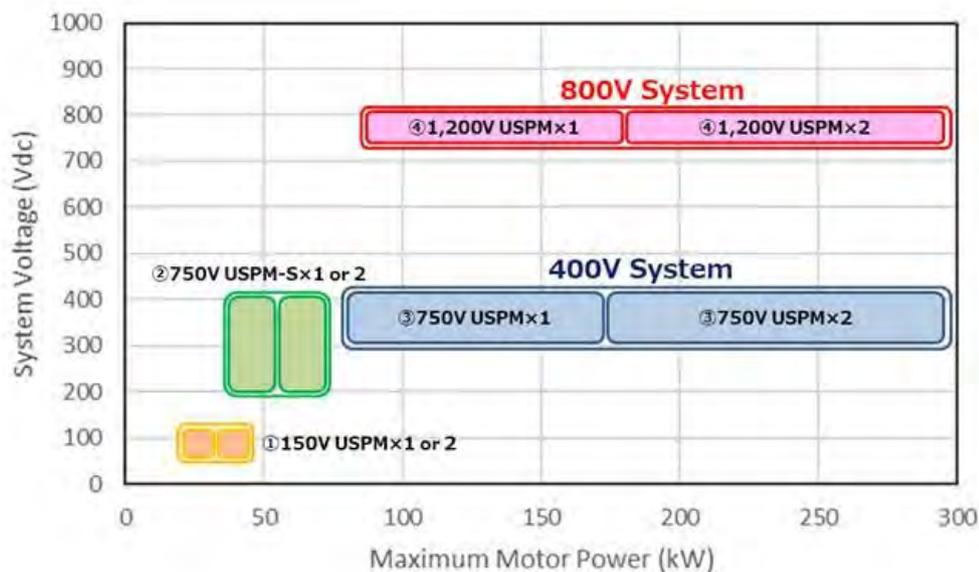


図 2-2-21 USPM の電気自動車への適用

・また、要素技術毎の適用効果については、要素研究毎の現時点での成果を鑑みて適用可能性適用効果を検討した。

i) ノイズフリーEMC フィルタ

電気自動車向けインバータには EMC フィルタは必須の部品であり、ノイズフリーEMC フィルタ技術の適用により、ノイズ低減、EMC フィルタの小型化が期待できる。

ii) アクティブゲートドライバ

アクティブ・ゲート・ドライブ技術は、パワーデバイスの高速スイッチング時に発生するサージ電圧を抑制は、損失低減による電気自動車の走行距離の向上やノイズ低減に寄与が可能である。

iii) 瞬時デジタル駆動制御

50MHz レベルの極めて高速なフィードバック制御を電気自動車の駆動用モータ制御に適用することで、トルク急変時の電流のオーバーシュート・アンダーシュートの抑制や故障時にインバータを瞬時に停止できるなどが可能となる。

iv) USPM のスイッチングタイミングを制御する並列化技術

本技術により例えばインバータ回路構成の USPM を容易に並列化できるため、出力範囲の異なる電気自動車への USPM の適用が可能となる。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

(2) 高パワー密度、高温動作可能な WBG チップ搭載パワーモジュール (B-①(2))

図 2-2-22 に、本 SIP にて開発した USPM(ユニバーサルスマートパワーモジュール)の概略イメージを示す。USPM とは、新 WBG デバイス(低コスト)+ユニットモジュール(ユニバーサル性)+高速デジタル制御(スマート性)を兼ね揃えた新しいパワーモジュールである。再生可能エネルギー等の不規則な変動電源にも常に高効率の対応が可能であり、ユニットモジュールのため様々な電力変換器に対応可能、フルカスタム化の実現によりアプリケーション技術者の開発・設計の簡素化が可能となる、という様々な特徴をもつ。この USPM に搭載するコア・パワーモジュールの開発を、本研究開発項目では行った。新 WBG デバイスを搭載しユニバーサル性をもたせるために、下記の構成のパワーモジュールを開発した。

- ・回路構成：2in1 構成とすることで、多くの回路方式(4in1、6in1、3レベルなど)に対応可能
- ・定格：1200V/100A とすることで、中・大容量に対応可能
- ・ジャンクション温度(T_{vjmax})：200°C 対応とすることで、新 WBG デバイスに対応可能
- ・パワー密度、放熱性能：150%以上(従来比)とすることで、USPM 小型化に対応可能
- ・主配線インダクタンス：10nH 以下とし、新 WBG デバイスと高速デジタル制御との親和性付与



図 2-2-22 USPM の概略イメージ図

【実施項目 1】コア・パワーモジュール (Layer1) の全体設計、試作評価
【達成目標】パワー密度・放熱性能 150%(従来比)、 $T_{vj}200^{\circ}\text{C}$ 動作可能なモジュールの試作・評価完。

- ・USPM 構想は、複数のモジュール化した USPM を組合せてシステムを構築する。USPM の実現には搭載するパワーモジュールの高パワー密度化、高放熱化、高速応答性などが求められる。今回、USPM の組合せの容易性、制御性向上等を実現するため、小型高密度・低熱抵抗・低インダクタンスを

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

備えたコア・パワーモジュールを開発した。図 2-2-23 に、コア・パワーモジュールの内部構成と開発した各要素技術を示す。

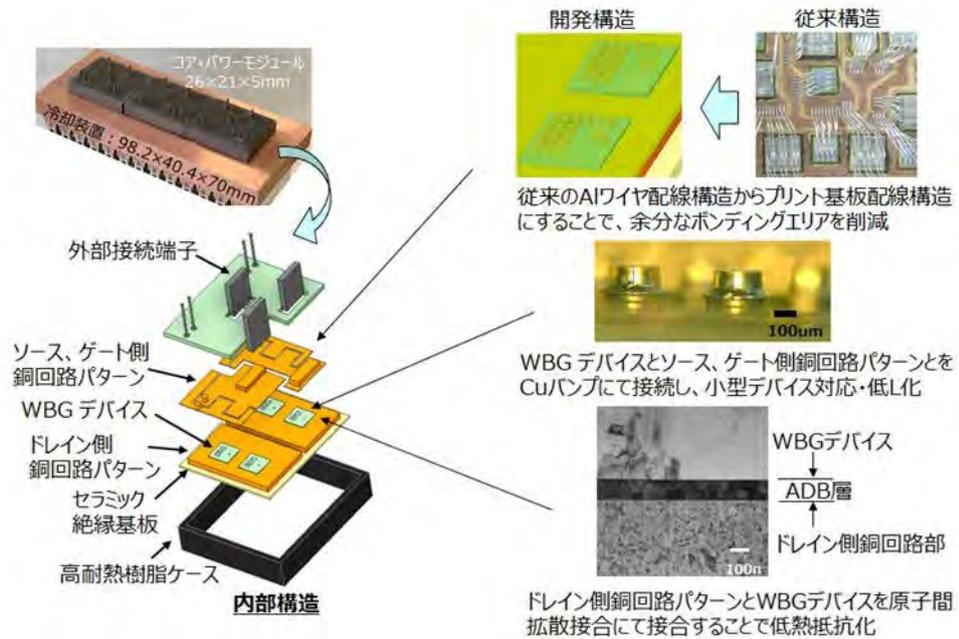


図 2-2-23 コア・パワーモジュールの内部構成と開発した各要素技術

- ・放熱性能 161%向上まで達成し、目標 150%以上を満足した。
- ・ヒートサイクル 1,000cyc. までを行い、チップ下接合部にて、電気特性および断面観察結果で特に問題が無いことを確認した。
- ・連続動作試験(500V, 70A, 100kHz)で、特に問題が無いことを確認した。

【実施項目 2】 超高熱伝導基板の開発

【達成目標】 絶縁基板耐圧 3300 V 以上、耐温度サイクル性 500 cyc. 以上 (基板単体)。

- ・温度サイクル(-45°C ⇔ 200°C) 500 cyc. 後に、絶縁基板の Cu 箔接合界面に剥離が無いこと、また印加電圧 AC 5kV にて部分放電発生が無いことを確認した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 3】 チップ下直接接合技術の開発

【達成目標】 200℃高温動作対応、チップ下接合部の熱抵抗 90%低減(従来比)。

- ・ドレイン側銅回路パターンと WBG デバイスを、原子拡散接合を用い接合することで、熱抵抗は従来のはんだ接合より 33%低減した(図 2-2-24 参照)。この技術開発等により、熱抵抗 94%低減(従来比)を確認できた。

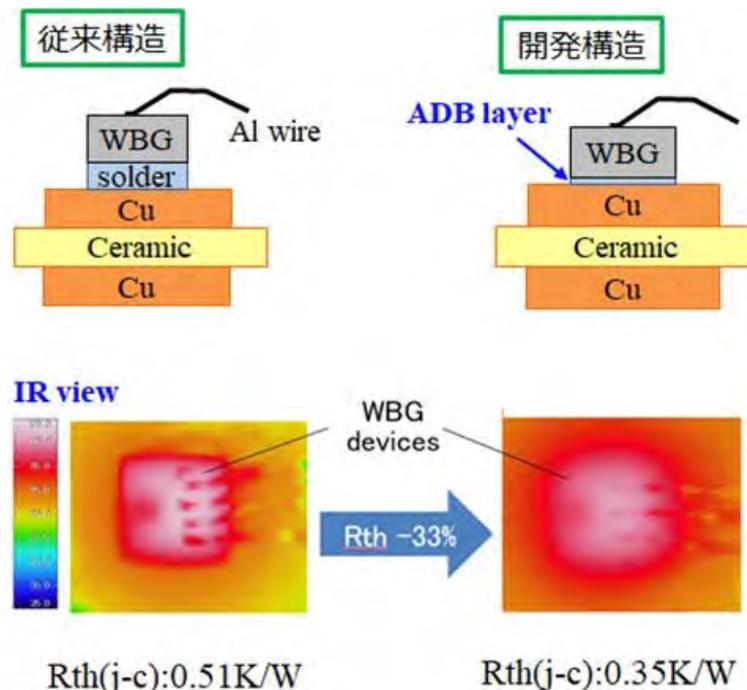


図 2-2-24 チップ下直接接合熱抵抗比較結果

- ・リフロー温度である約 300℃までの温度域における接合界面の安定性を明らかにするため、Au 接合膜の接合界面構造の温度変化を透過型電子顕微鏡により評価した。312℃以下では、接合界面の基本構造はほとんど変化せず、優れた熱安定性を有することを示した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

(3) コランダム構造酸化ガリウムを用いたパワーMOSFETの開発 (B-①(3))

・酸化ガリウムの位置付け

再生可能エネルギーの拡大、ワイヤレス給電技術のイノベーションに欠かせないキーデバイスである。本 SIP の中で取り組んだガリウム系パワーデバイスの中では、高耐圧領域を得意としている(図 2-2-25)。駆動周波数は SiC 程度であるが、さらに高耐圧領域を守備することが期待されている。

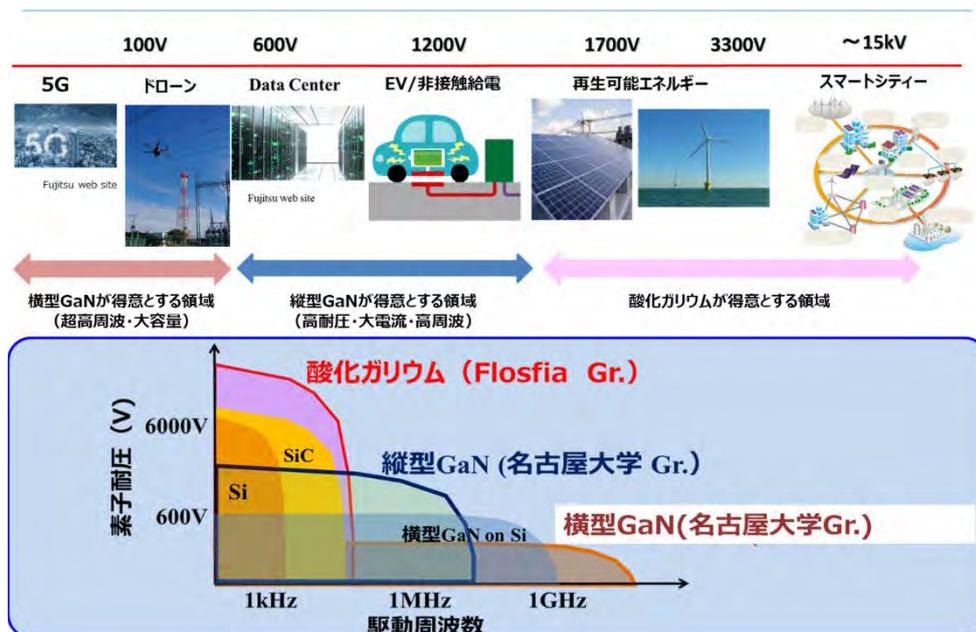


図 2-2-25 酸化ガリウムの位置付け

・コランダム構造酸化ガリウム (α -Ga₂O₃) の特長

独自アプローチで「SiC を超える性能を Si なみの低コストで作る」ことにより社会実装を促進する。従来の Si、急激に伸びている SiC、SIP 第 1 期で開発した β -Ga₂O₃ (結晶構造が異なる酸化ガリウム) と損失、コスト、技術・事業ステージについて比較した(図 2-2-26)。なお、SIP 第 1 期で開発した β -Ga₂O₃ は、損失・コストともに SiC と α -Ga₂O₃ の中間の特性を示す。

- i) 超低損失：材料物性が優位で、パワーデバイスとしての性能指数であるバリガ性能指数(低周波)が SiC と比較しても 20 倍。
- ii) Si なみの低コスト：安価なサファイア基板(照明用 GaN-LED の基板として世界的に安価で大量に供給されている)上に、非真空プロセス(ミストドライ法[®])でエピタキシャル成長するという独自アプローチで低コストを実現。
- iii) 技術・事業ステージ：SIP 第 2 期開始前は小面積横型 MOSFET の基本動作(ノーマリオフ動作)を初めて確認(世界初)した研究のごく初期段階

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

であったので、下記の取り組みを実施。

○MOS に最適な同じ結晶構造（コランダム構造）を持つ p 型層を開発 → ノーマリオフ

○MOS 界面制御技術の開発 → 高チャネル移動度 → 低オン抵抗

○高耐圧縦型パワー-MOSFET 構造を形成するプロセス技術の開発

- ・ **バリガ性能指数（パワーデバイスの性能指標）** については下記の表を参照
 バリガ性能指数（低周波）：オン抵抗 R_{on} のみを比較 → SiCの約20倍
 バリガ性能指数（高周波）： $R_{on} * Q_g$ を比較 → SiCの約5倍
- ・ **p型層**を用いて絶縁破壊電界の極限に迫るデバイス設計を可能にすることがキーポイント。
 p型層が無ければゲート絶縁膜の信頼性確保の観点から3MV/cm程度が上限となり、SiC・GaNなみの絶縁破壊電界強度しか出せず、移動度が低い分だけオン抵抗が高くなる。

| 材料名 | Si | 4H-SiC | GaN | β -Ga ₂ O ₃ (βガリア構造) | α -Ga ₂ O ₃ (コランダム構造) | |
|----------------------------------|--------------------------------|--------|-------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------|
| バンドギャップ E _g (eV) | 1.1 | 3.3 | 3.4 | 4.5 | 5.3 | |
| 移動度 μ (cm ² /Vs) | 1,400 | 1,000 | 1,200 | 300 | 300 (推定) | |
| 絶縁破壊電界 E _c (MV/cm) | 0.3 | 2.5 | 3.3 | 7 | 10 | |
| 比誘電率 | 11.6 | 9.7 | 9.0 | 10 | 10 | |
| バリガ 性能指数 SI = 1 | 低周波 ($\epsilon\mu E_c^2$) | 1 | 340 | 870 | 2,307 | 6,726 (推定) |
| | 高周波 (μE_c^2) | 1 | 50 | 104 | 117 | 238 (推定) |

図 2-2-26 コランダム構造酸化ガリウム (α -Ga₂O₃) の特長

- ・ α -Ga₂O₃ パワーデバイスの耐圧守備範囲（図 2-2-27）

SiC よりさらに低オン抵抗であり、高速タイプの SBD (Schottky Barrier Diode)、MOSFET の守備範囲がさらに高耐圧側へ広がる。活性層厚さ（高耐圧を保持する n-型エピ層）が Si 比 1/30、SiC 比でも 1/3 と薄く、高耐圧でも低オン抵抗にすることが可能である。MOSFET の適用範囲は、Si では 900V、SiC では 3.3~6.5kV に対して、 α -Ga₂O₃ では 10kV 程度まで広がる。これにより、高耐圧でも駆動周波数を上げることでよりコンパクトで安価な電力変換器を実現することが可能となる。また、従来の高耐圧パワーデバイスの代表格である Si-IGBT ではコレクタ接合の拡散電位を超えないと電流が流れなかったのに対して、MOSFET はゼロ電位から電流が流れるので、駆動時間の大部分を占める低負荷での損失低減効果が大きい。

- ・ α -Ga₂O₃ が狙う市場（図 2-2-27）

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

富士経済「2022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」によれば、全世界のパワーデバイス市場規模は、2兆3386億円（2022年）から5兆3587億円（2030年）と急速に拡大すると予測されている。その中で、低耐圧デバイス領域は制御の一体化、低コストの利点があるSiが将来も優勢な分野であると考えられるが、SiC、GaNなどの新材料パワーデバイスは高価であるがゆえにそれらの長が大きく貢献できる分野に限定される。SiCは低損失・大容量という利点を活かして比較的大型の電力変換器に搭載される中耐圧・高耐圧デバイス領域で期待されている。GaNは低オン抵抗、高速スイッチングという利点を活かして数百V耐圧領域の電源用途で期待されている。それらに対して、 α -Ga₂O₃は低損失であると同時に低コストでもあるので安価な小型電源から電気自動車などのインバータ、電力系統連系用の大容量変換器まで幅広く活用することが期待される。

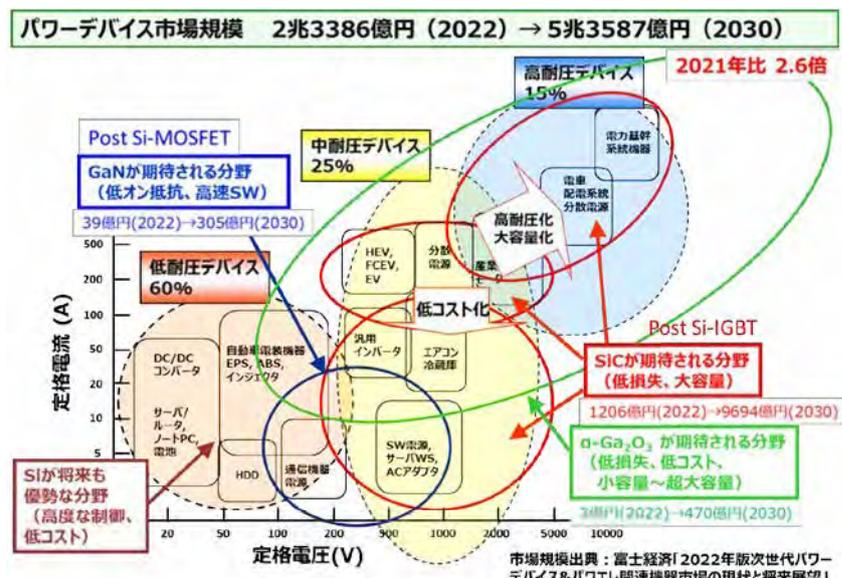


図 2-2-27 α -Ga₂O₃ パワーデバイスの適用が期待される分野

【実施項目 1】 MOSFET の開発

【達成目標】 プレーナゲート構造 α -Ga₂O₃ 縦型 MOSFET の動作確認 (耐圧 1200V、電流 10A、特性オン抵抗 16m Ω cm²)

・成果①：MOS チャンネル移動度 72cm²/Vs 実証 (図 2-2-28)

ノーマリオフ動作する横型 MOSFET でチャンネル移動度 72cm²/Vs を実証した。この数値は市販されている SiC-MOSFET の約 2 倍の値である。SiC を超える低い特性オン抵抗を実現するためには、ドリフト層抵抗 (エピ抵抗) を低減するだけでは不十分であり、SiC より低いチャンネル抵抗を実現するためにチャンネル移動度の向上が必須である。半導体・オブ・ザ・イヤ

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

—2020(産業タイムズ主催)で半導体デバイス部門グランプリを受賞し、この成果の価値は高く評価されている。

- ・ 成果②： 導電 p 型 $\alpha-(\text{Ir}, \text{Ga})_2\text{O}_3$ 層で耐圧 1400V を実証 (図 2-2-28)

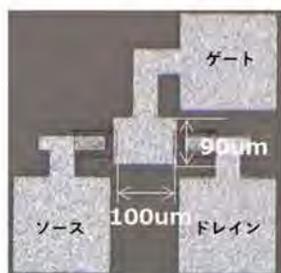
縦型 MOSFET の電流遮断層への適用を目的とした p 型 $\alpha-(\text{Ir}, \text{Ga})_2\text{O}_3$ 層を用いた疑似縦型 PiN ダイオードで耐圧 1400V を実証した。 $\alpha-\text{Ga}_2\text{O}_3$ の最大の特長である高破壊電界強度を極限まで引き出すためには p 型層が不可欠であり、実際に耐圧を実証した成果は大きい。p 型 $\alpha-(\text{Ir}, \text{Ga})_2\text{O}_3$ 層は高速スイッチング時に発生するホールを排出する p 型導電層として活用することができ、GaN で課題となっているダイナミックアバランシェ破壊を抑制することが可能である。

- ・ 成果③： 完全縦型 MOSFET の動作実証 (図 2-2-28)

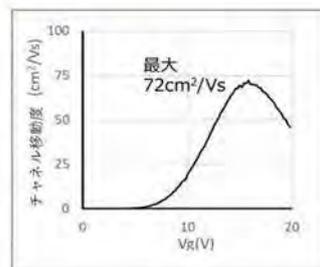
金属支持基板に張り付けた完全縦型 MOSFET でノーマリオフ動作を実証した。 $\alpha-\text{Ga}_2\text{O}_3$ の完全縦型 MOSFET 動作は世界初の成果である。 $\alpha-\text{Ga}_2\text{O}_3$ は準安定相 (500°C 以上で熱処理すると $\beta-\text{Ga}_2\text{O}_3$ に相転移する) のためバルク基板を作製することができない。サファイア基板を除去して金属支持基板に転写するプロセスは難易度が高く、他には成功例はない。バルク基板を持たない $\alpha-\text{Ga}_2\text{O}_3$ を放熱特性の高い金属支持基板に転写することで、酸化物の熱抵抗の高さ、SiC より小さなチップでの放熱の課題を解決することが可能となった。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

① MOSチャネル移動度 $72\text{cm}^2/\text{Vs}$ 実証

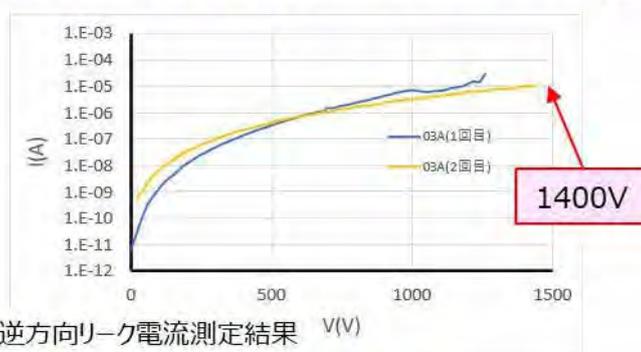


試作した横型MOSFETの顕微鏡写真



チャネル移動度のゲート電圧依存性

② 導電p型 $\alpha\text{-(Ir,Ga)}_2\text{O}_3$ 層で耐圧1400Vを実証

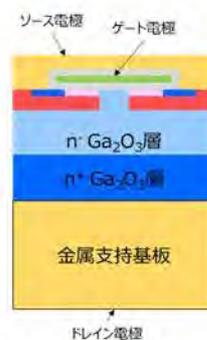


逆方向リーク電流測定結果 V(V)

③ 完全縦型MOSFETの動作実証



試作した完全縦型MOSFET



完全縦型MOSFETの断面図

図 2-2-28 B-①(3)の主要な成果概要

- ・ 高耐圧化・大電流化を目指した完全縦型 MOSFET の試作で動作を確認、通電電流は 0.3A まで増加した。要素技術が出揃って試作プロセスの改良が進展してきており、最終目標達成へ向けて開発を進めた。 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の完全縦型 MOSFET の動作確認だけでも世界初の成果であるが、2022 年 10 月時点でアンペア級動作が見えてきており、2022 年度末までに 10A 通電達成へ向けて開発を進める。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

- ・ α -Ga₂O₃ MOSFET を 10 μ m 以下に薄膜化して高放熱支持基板へ転写するプロセスは、MOSFET 構造にて実証を完了した。すでに SBD では量産化プロセスに組み込まれている技術であるが、電極構造やチップ寸法などの違いにより追加の開発が必要となっていた。この技術を持つのは FLOSFIA だけである。
- ・ 昨年度のオン抵抗分析によりボトルネックと判明したオーミック抵抗低減プロセスを改良し、n⁺層に対するオーミック抵抗は 10⁻⁴Ω cm² 台で安定化させることに成功した。
- ・ MOS 特性・信頼性向上のため、ゲート絶縁膜形成プロセスを 2020 年度から継続して改良を実施した。チャネル移動度 μ_{ch} の向上、ゲート閾値電圧変動 ΔV_{th} の抑制、ゲート絶縁膜信頼性 TDDB の確保に取り組んだ。
- ・ SBD 構造（完全縦型 MOSFET からスイッチング構造を取り除いた構造）で、耐圧 1200V 程度、電流 3A、微分特性オン抵抗 2.6~2.8mΩ cm² を実証した。ドリフト層部分の抵抗（SBD と共通の抵抗）成分は十分に低く、スイッチング構造部分の抵抗成分低減が課題となっている。2022 年度末までに、高抵抗成分を抽出して試作プロセスを改良し最終目標を達成する予定である。
- ・ 最終目標である耐圧 1200V、電流 10A、特性オン抵抗 16mΩ cm² を達成することは、世界初の α -Ga₂O₃ MOSFET の実証として大きな意義がある。
- ・ 最終目標は静特性（耐圧、電流、特性オン抵抗）が対象であるが、動特性についてもシミュレーションと電気特性評価（半導体パラメータアナライザのオシロモード）を実施した。SIP 第 2 期終了後は、高速スイッチング特性の改良にも取り組んでいく。
- ・ 試作している素子設計で動特性シミュレーションした結果、80ns でターンオフした。さらに微細化による高速化が示唆された。SiC-MOSFET などの 20ns が狙えると考えている。
- ・ 完全縦型構造で、ウェハ状態でドレイン電流 $I_d=0.42A$ 、ゲート電圧=0~25V（ノーマリオフ）にて動特性評価を行った結果、ターンオン時間 t_r 、ターンオフ時間 t_f とともに約 20 μ s とかなり遅いが、正常な波形が得られた。制御系のゲート電圧の t_r 、 t_f が遅いこと、ゲート電流が小さいことが原因と考えている。
- ・ アンペア級の完全縦型構造素子完成後に正式なダブルパルス試験を実施する。既に SiC-MOSFET と α -Ga₂O₃ SBD の組み合わせで評価は実施済みである。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

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

カーボンニュートラルの実現や高齢化社会における社会システムの効率化、産業分野における生産性の向上につながる「利便性の高い電力供給技術」としてワイヤレス電力伝送技術への期待が大きい。

本テーマでは、ワイヤレス電力伝送システムの小型化、高効率化、大電力化を実現することを目的に、窒化ガリウム (GaN) による縦型及び横型のパワーデバイスと、ワイヤレス電力伝送向けの MHz 帯およびマイクロ波帯の回路システムに関するテーマを推進した。

(4) ワイヤレス電力伝送高速スイッチングデバイスの開発 (B-②開発テーマ 1)

本開発テーマでは、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 GaN デバイスの高速性を引き出す縦型 GaN スwitching デバイスの研究開発を実施した。

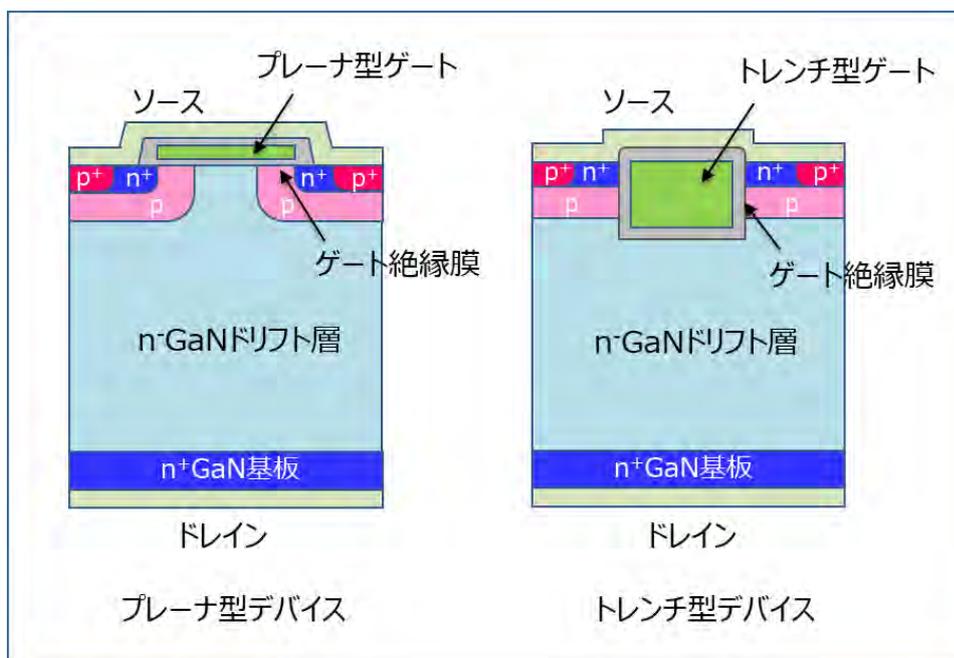


図 2-2-29 開発したプレーナ型デバイスとトレンチ型デバイスの断面模式図

【実施項目 1】 トレンチ型 GaN 高速スイッチングデバイスの開発

【達成目標】 トレンチ型縦型スイッチングデバイスの試作実施 (耐圧 600V/5A クラス、ゲート容量 1/2 (対 SiC)、トレンチゲート型とプレーナゲート型との技術ベンチマーク (シミュレーションと実測両方で))。

・縦型 GaN パワーデバイスエピタキシャル技術の確立

6 インチ~8 インチウエハに対応する低欠陥密度かつ均一性に優れたエピタキシャル成長技術は、GaN デバイスの社会実装に不可欠の技術である。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

名古屋大学はさまざまなエピタキシャル成長装置を保有しており、さまざまなノウハウを有している。試験的なエピタキシャル成長、特にパーティクルなどのデバイス不良を必ず引き起こす欠陥とドーピングの均一性、再現性などについて検討を行い、その知見を元に縦型 GaN パワーデバイスに適したエピタキシャル成長装置の仕様を策定し、導入を行い、結晶成長プロセスおよび装置運用条件の確立に取り組んだ。その結果、パーティクル欠陥の安定的な大幅低減に成功し、また、ドーピング均一性もデバイス作製に十分なレベルに改善することに成功した。広い濃度範囲で p 型、n 型の不純物ドーピングを可能とする技術の確立は、多様な GaN デバイスの設計を可能にし、産業競争力強化に寄与する技術的価値の高い成果である。導入した装置は、名古屋大学の全国共同利用・共同研究拠点の装置として運用し、今後、国内企業や大学などの縦型パワーデバイスの研究開発にエピタキシャル成長サービスを提供し、我が国の今後の研究の発展に資する。必要に応じて、国内企業に対して技術コンサルティング、技術移転も行う。

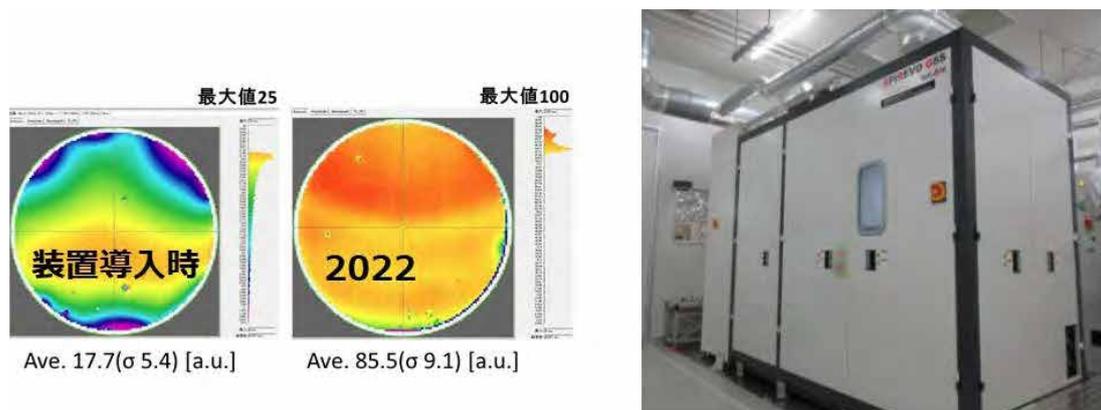


図 2-2-30 確立した縦型 GaN エピ装置の外観（右図）と本装置により成長させた 2 インチウェハ上の不純物密度比較（左図）

・ アンペア級縦型 GaN トレンチ MOSFET の開発

マクロマクロ欠陥を低減する GaN エピタキシャル技術を背景に、縦型 GaN トレンチ MOSFET においてアンペア級素子の実現可能性（デバイス動作）を示した。これまで、大学、企業の個別研究、あるいは文部科学省省エネルギー社会実現に資する次世代半導体技術開発などの大規模な研究で、絶縁膜、オーミック電極、イオン注入、耐圧維持構造などさまざまな要素技術の研究開発が行われてきたが、これらは一つ一つの要素を切り出した基礎研究であった。アンペア級デバイスを想定し、かつ、300 工程近くにもおよぶデバイスフルプロセスでの検討は行われてこなかったが、

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

本課題でこれに取り組んだ。プロセス間の干渉や予期せぬ現象などがあり様々な課題が抽出され、その発生メカニズムの解明、対策方法の確立に取り組んだ。その結果として、5 A以上の電流を流すことのできるトレンチ MOSFET の実現に成功した。

また、本課題で提案したゲート構造の最適化による高周波化についてコンピュータシミュレーションにより系統的に調査検討を行い、デバイス性能とコストを両立する最適設計点が存在することをはじめて明らかにしてその設計指針を提示した。試作したデバイスにおいて、実際にこの指針が成立することも実験的に示すことができた。

文部科学省革新パワーエレクトロニクスプロジェクトにおいて、デバイス製造の再現性、制御性の検討と、GaN MOS のチャネル移動向上の研究が現在進行中である。本研究成果出るアンペア級デバイス作製上の課題と対策を文科省プロジェクトに引き継ぐことで、デバイスの完成度をさらに高める。

以上のように、本課題の実施により実験、理論の両面において縦型 GaN トレンチ MOSFET について日本の先進性をさらに一段高めることができた。また、今後の研究の継続、展開について、文部科学省プロジェクトへの継承や、名古屋大学の共同利用・共同研究拠点での実施、あるいは企業との共同研究などを計画しており、社会実装に向けてしっかりと進める準備も整っている。

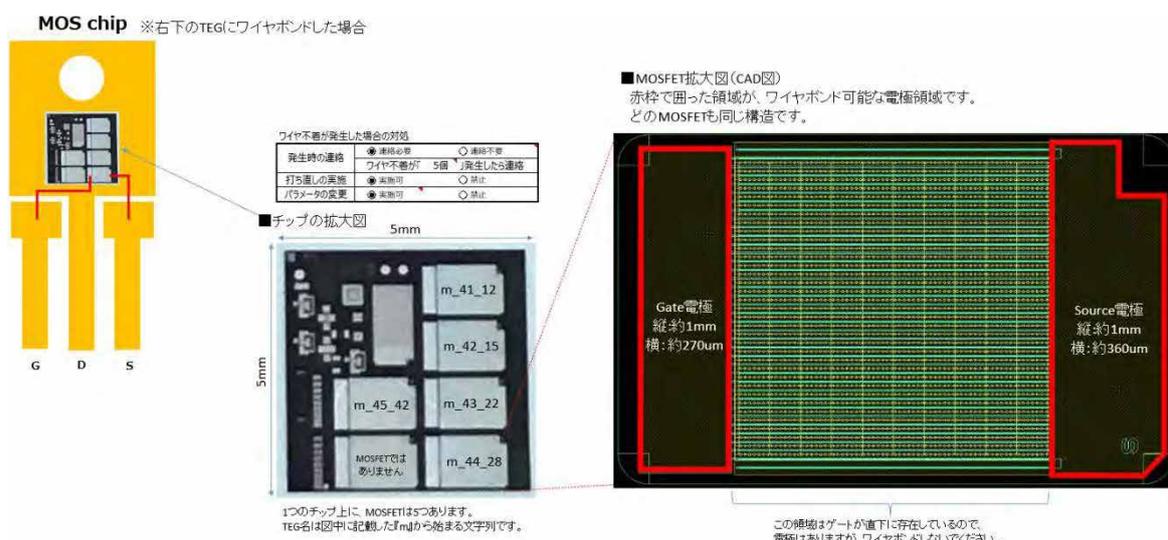


図 2-2-31 作製したアンペア級縦型 GaN トレンチ MOSFET

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 2】 プレーナゲート縦型 GaN 高速スイッチングデバイスの開発
【達成目標】 低容量絶縁ゲート構造のプレーナゲート縦型 MOSFET の改善試
作実施 (縦型 MOSFET 動作 (耐圧 600V、電流 1A 以上)、ゲート容量 1/2
(対 SiC))

- ・ 耐圧、低オン抵抗、低ゲート容量を両立するプレーナゲート型縦型 GaN MOSFET 構造として、オン抵抗 R_{on} とゲート容量 C_{iss} のトレードオフをデバイスシミュレーションで検証し、 R_{on} で規格化したゲート容量指標 ($R_{on}C_{iss}$) を最小化した結果、耐圧 600V かつ $R_{on}C_{iss}$ が対 SiC 比 27% となる構造を決定できた。
- ・ 設計した構造に対応する微細寸法の活性領域をイオン注入プロセスで実現。エピ濃度とイオン注入で形成する JFET 構造部の濃度とを振った簡易構造の MOSFET 素子で、耐圧 >600V と低 R_{on} ($<1m\Omega cm^2$) を両立できることを示し (図 2-2-32)、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を実現できることを示した。

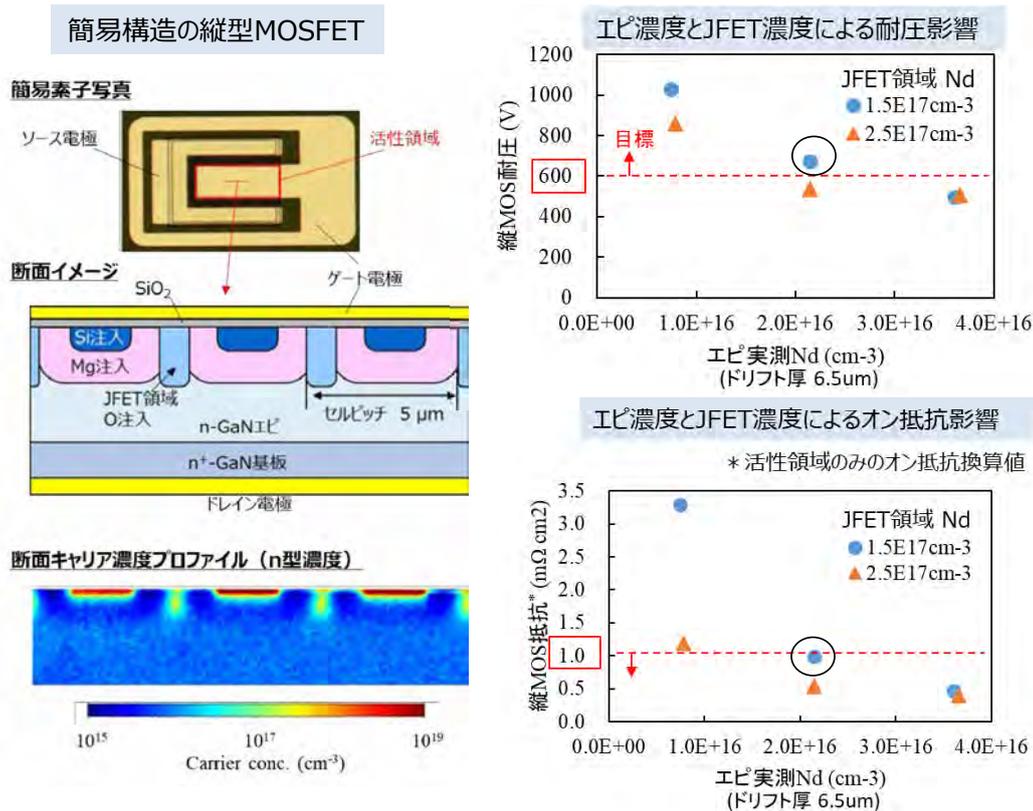


図 2-2-32 簡易構造でのプレーナゲート型 GaN MOSFET 性能検証

- ・ イオン注入で形成した微細活性領域を大面積化し、図 2-2-33 に示す多層配線構造の形成プロセスと組合せ、1mm口のプレーナゲート型縦型 GaN

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

MOSFET チップを実現し、FET のオン動作で 1A 動作を達成した。また、ゲート容量も設計通りに得られることも確認でき、高速スイッチング素子の実現性を実証した。プレーナゲート型は本グループが世界に先駆けて開発を進めており、縦型 GaN デバイスの社会実装に向けた大きな進展である。

- ・ プロセスインテグレーションと大面積化に際し、簡易素子での特性と比べ、オン抵抗の増大、耐圧（初期リーク）が問題となったが、オン抵抗に関しては JFET 領域の形成条件最適化により対策を完了した。初期リークに対しては表面性リークと接合リークとに大別し、表面性リークに対しては、プロセス条件、および終端構造での対策により抑制した。接合リークについては、エピ基板中の結晶欠陥が原因であることを明らかにし、エピ基板の対策により改善を確認し、600V/1A MOSFET チップの見通しを得た。

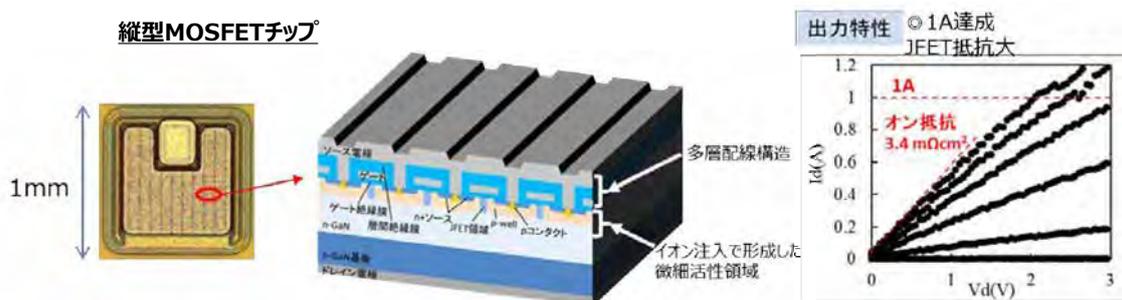


図 2-2-33 簡易構造でのプレーナゲート型 GaN MOSFET 性能検証

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

(5) MHz 帯電力伝送システム基盤技術の開発 (B-②開発テーマ 2)

本開発テーマでは、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 デバイスの高速性を引き出すスイッチング回路技術、大容量化技術の研究開発を実施した。

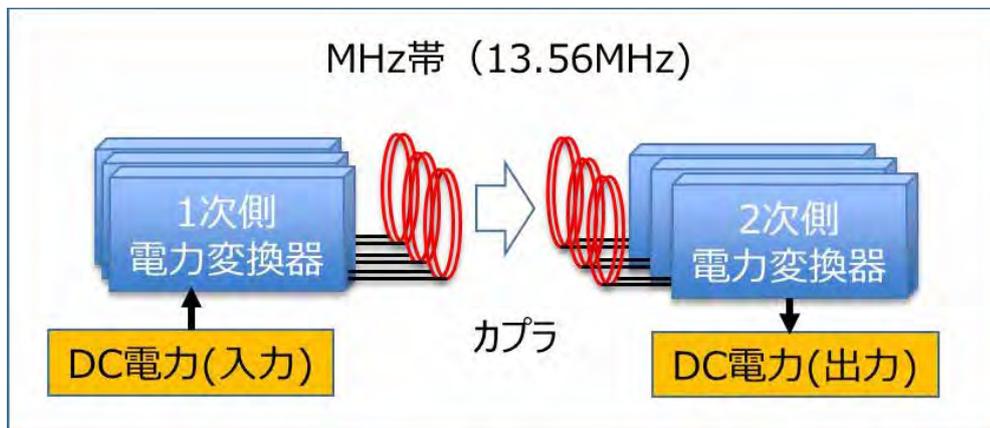


図 2-2-34 非放射型ワイヤレス電力伝送システムの回路模式図

【実施項目 1】 高速スイッチング回路基盤技術の開発

【達成目標】 MHz 帯、3kW 級の GaN パワーデバイスを用いたスイッチング回路実機試作、高効率動作実現。

- ・ 単相の L-S インバータを提案し、GaN-HEMT でも安定的に高出力電力を実現した。最適化設計によって、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) を達成した。

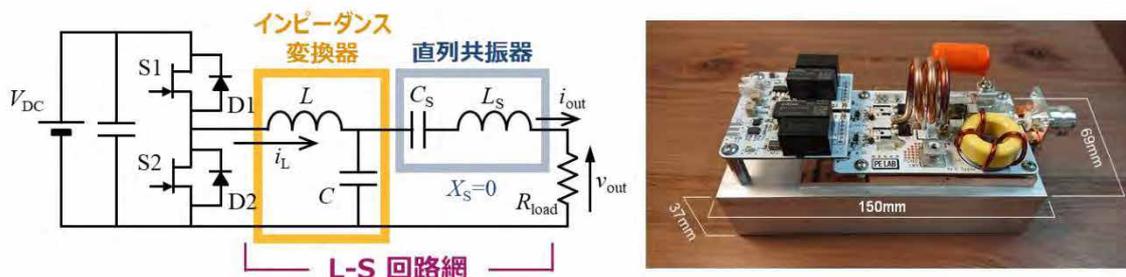


図 2-2-35 提案した単相 L-S インバータ

- ・ 単相インバータにおいて世界最高出力 2.8kW、世界最高効率 96.2%を達成したが、不完全オフ状態に起因するパラメータずれにより電流振幅が設計値より増大している。これによって 2.8kW 以上の高出力化が困難になり、2022 年 10 月時点では 3kW を達成できていない。そこで、不完全オフ状態を考慮したパラメータ最適化設計手法を提案した。計算の結果、GaN-HEMT GS66516T においては、理想スイッチの 2 倍程度の電荷を引き抜けば

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

不完全オフ状態に対処できることが判明している。2022 年度末までに、この不完全オフ状態を考慮した新規の設計法に基づき、インバータ実機を新たに製作し、出力電力 3kW を達成する予定である。

【実施項目 2】 高速ゲート駆動 IC の開発および送受電回路での動作検証
【達成目標】 ゲート駆動 IC (3 次) 試作実施、マスクレイアウトの IC 内配線と PCB 基板との協調設計による駆動性能の高性能化。

- ・ IC 内配線と PCB 基板との協調設計による高速スイッチング回路用ゲート駆動 IC において、低入力容量、等長配線化を追求し、駆動速度 (T_r/T_f) 1.5ns を実現した。

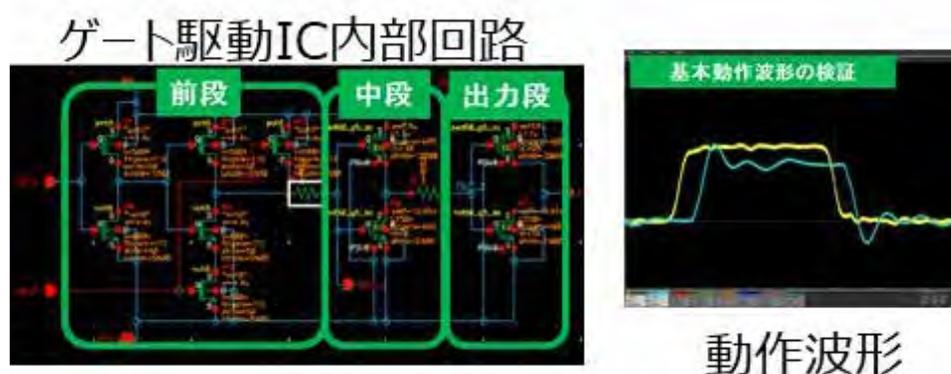


図 2-2-36 設計した高速スイッチング回路用ゲート駆動 IC

- ・【2022 年 10 月時点見込み】ゲート駆動 IC の周辺レイアウト改良によって寄生インダクタンス削減(高速化)し、目標($t_r/t_f=1ns$)を達成する。そして、本ゲート駆動 IC による GaN 搭載の無線給電回路の 100W 動作を実証する予定である。

【実施項目 3】 MHz 帯ワイヤレス電力伝送システムの開発

【達成目標】 7.7kW 級の MHz 帯、kW 級のスイッチング回路実機試作、実機による並列化動作の検証。

- ・負荷電流バランス回路による並列運転技術を開発し、MHz 帯の高出カインバータにて並列動作を実証した。スイッチング回路を複数台並列運転することで、大電力アプリケーションへも GaN デバイスを適用することが可能となったことから、GaN デバイスの活用範囲の拡大に寄与する成果である。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

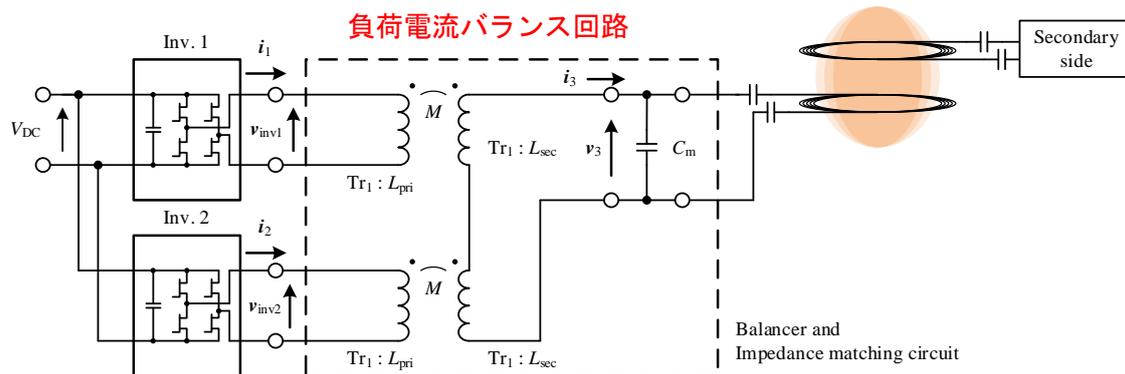


図 2-2-37 負荷電流バランス回路図

- ・【2022 年 10 月時点見込み】電流バランス回路の漏れインダクタンス成分を考慮した並列運転技術を開発し、50W 測定系でのインバータのさらなる大電力化に寄与する。

【実施項目 4】 MHz 帯ワイヤレス電力伝送用カプラの開発

【達成目標】 7.7kW 級の MHz 帯、kW 級の大容量カプラによる高効率電力伝送性能の検証。

- ・ MHz 帯 WPT システムにおける低損失カプラにおいて、銅箔を用いた高効率軽量カプラを開発し、伝送効率 92.6% (4.3kW) を達成した。2022 年度末までに、2 周波数を用いた並列伝送カプラの開発によりさらなる大電力化を目指す。

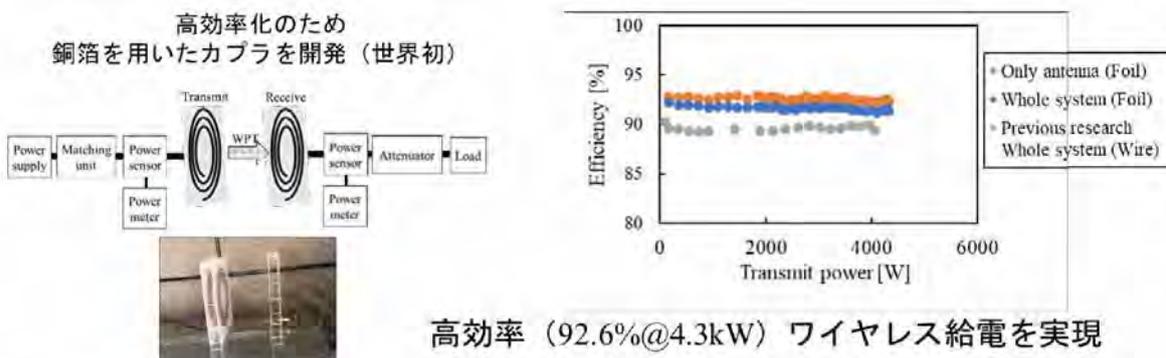


図 2-2-38 開発したカプラ (左図) とワイヤレス給電実験結果 (右図)

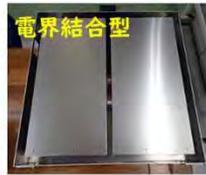
2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 5】 MHz 帯電力伝送システム基盤技術の開発
【達成目標】 MHz 帯電力伝送システムによる機能実証 (13.56MHz・7.7kW を実現する基盤技術の機能実証)。

- ・大電力向け可変リアクタンス負荷装置において、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した。
- ・MHz 帯電力システムの大電力化技術の一環として、1 次側インバータの並列運転技術を開発した。新たに開発した電流バランス回路により、複数のインバータの出力電圧にアンバランスが生じた場合にも、それぞれのインバータが出力する電流を同一とさせることに成功した。
- ・MHz 帯電力システムの高効率化のため、同期整流動作を入れた受電側整流器を開発した。検出した高周波電流に同期してスイッチング動作を行うことで、FET を用いた同期整流が可能であることを実証した。
- ・MHz 帯電力伝送システムの機能実証として、小型モビリティ（ドローン）への 13.56MHz 帯電力伝送システムを開発・実装した。電力伝送用カプラには図 2-2-38 と同型の銅箔を用いることで、300mm の電力伝送をカプラ重量（送受電 1 セットあたり）3.6kg で実現し、MHz 帯電力伝送システムが伝送システムの軽量化に有効であることを実証した。

▼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

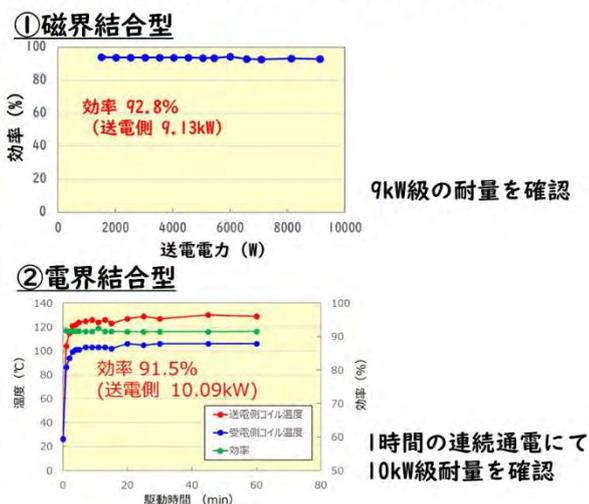


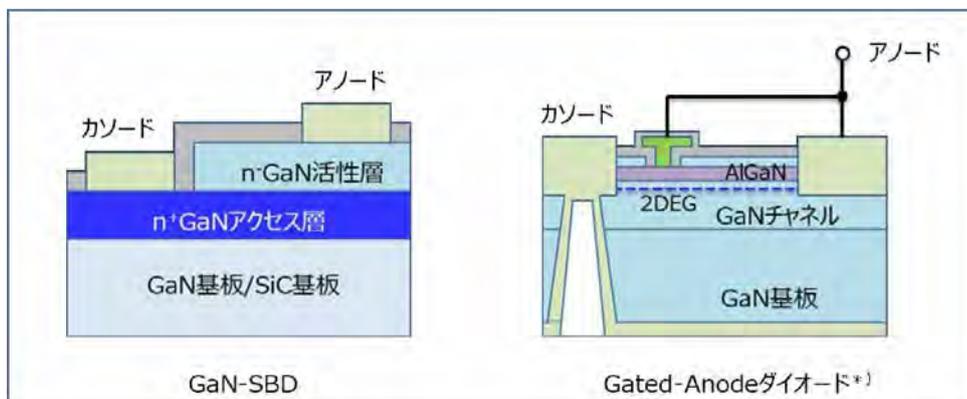
図 2-2-39 開発した可変リアクタンス負荷装置と特性評価結果

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

(6) ワイヤレス電力伝送高周波デバイスの開発 (B-②開発テーマ3)

本開発テーマでは、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、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を実施した。



*) 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

図 2-2-40 開発した整流用ダイオードの断面模式図

【実施項目1】高周波 GaN デバイスプロセス技術の開発
【達成目標】10W 級マイクロ波受電整流用 GaN デバイスのエピ構造、デバイスプロセス、電極レイアウト確定。

- ・Si パワー半導体ウェハサイズと同じ直径 8 インチの GaN 基板に対応可能なエピタキシャル成長技術確立し、低欠陥密度、高均一性 (組成、膜厚、電気特性) を達成した。

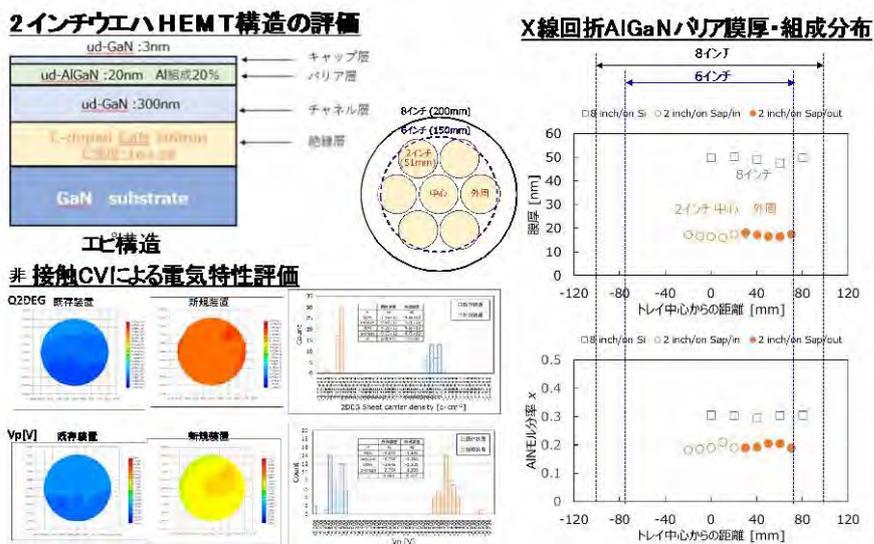


図 2-2-41 GaN-GAD に重要なエピウエハの均一性

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

- ・ 閾値制御性の高いワイドリセス構造と大電流高耐圧特性に優れるゲートリセスを検討し、最終的にゲートリセス構造に基本構造を確定した。当初、ゲートリセス構造で課題となった閾値制御性も、新規 GaN マーカー挿入構造により改善できており、量産性適用に目処がたった。

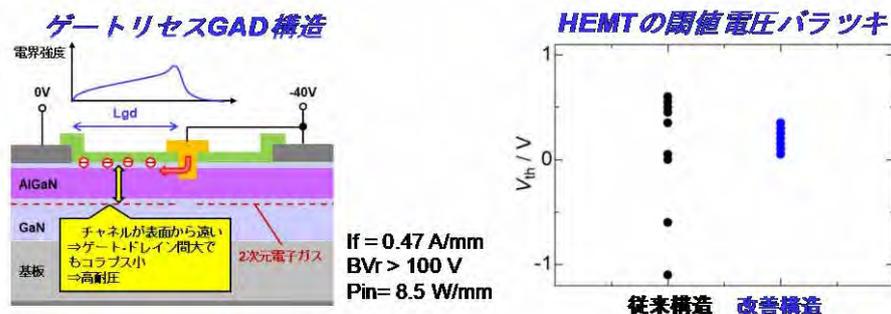


図 2-2-42 10W 級マイクロ波受電整流用 GaN デバイスの構造とダイオード動作に重要な閾値電圧ばらつき

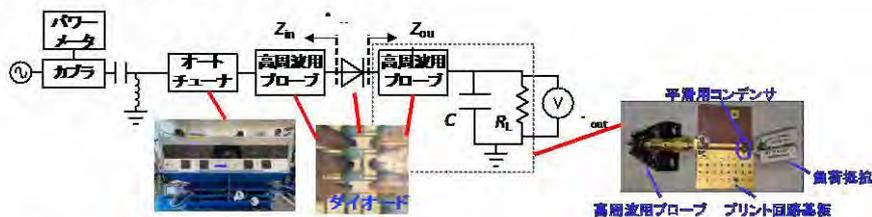
【実施項目 2】 高周波 GaN ダイオードの開発

【達成目標】 マイクロ波受電整流器用 10W 級 GaN デバイスに向けた基本設計、試作フロー決定。

- ・ ダイオード単体でのマイクロ波整流特性を評価できる測定系を構築し、実施項目 1 の成果で作成した基本素子構造ダイオードの整流特性評価をおこない、ゲートリセス構造の大電流高耐圧特性を反映した極めて高い整流特性 95% 2.4GHz-to-DC 変換を実証した。
- ・ 実施項目 1 で作製した大電力用ダイオードをマイクロ波整流特性シミュレーションができるようにモデル化を行い、10W 級の整流が可能であることを示した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

ダイオード単体の整流特性評価システムを構築



ゲートリセス構造で世界最高の変換効率(2.4GHz-to-DC)を実証

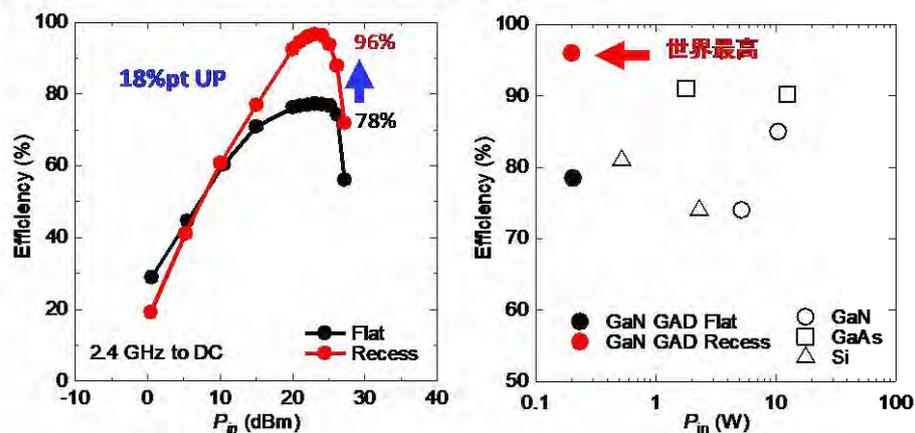


図 2-2-43 ダイオード単体でのマイクロ波整流特性を評価できる測定系とそれを用いた GaN-GAD の 2.4GHz-to-DC 整流特性 (ダイオード素子は実施項目 1 で作製)

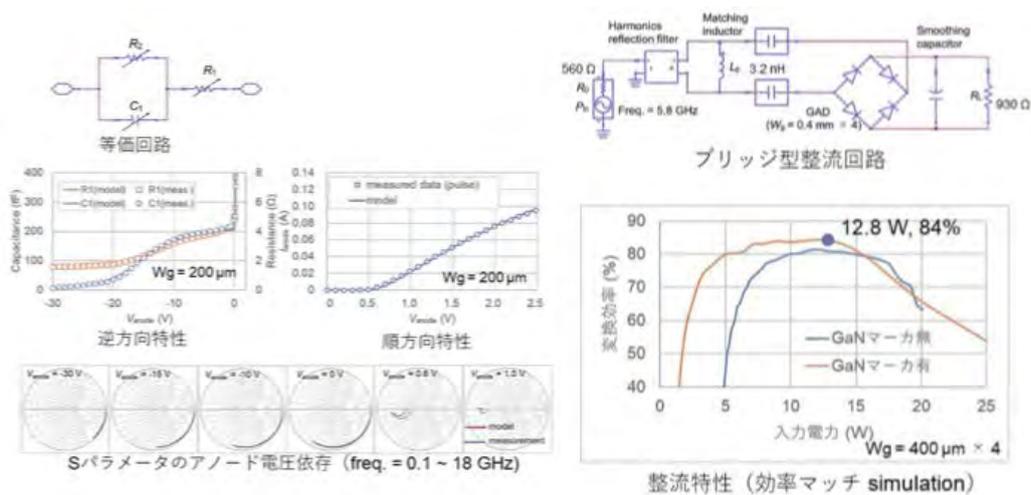


図 2-2-44 実施項目 1 で開発した GaN-GAD 素子の電力化に向けたモデル化とそれを用いた 10W 級特性予測

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 3】 ワイヤレス電力伝送用高周波デバイスの開発

【達成目標】 ワイヤレス電力伝送用 10W 化が可能な GaN 整流素子の実現。

- ・実施項目 1 および 2 の結果を踏まえて、製造ラインを用いた素子試作を行い、10W 級動作のための DC および容量特性指標、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)を達成していることを確認した。

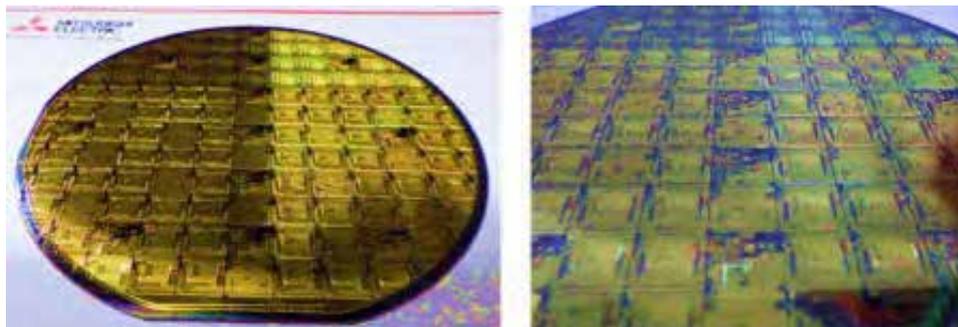


図 2-2-45 実施項目 1 および 2 の結果を踏まえて製造ラインにて試作した GaN-GAD ウェハ

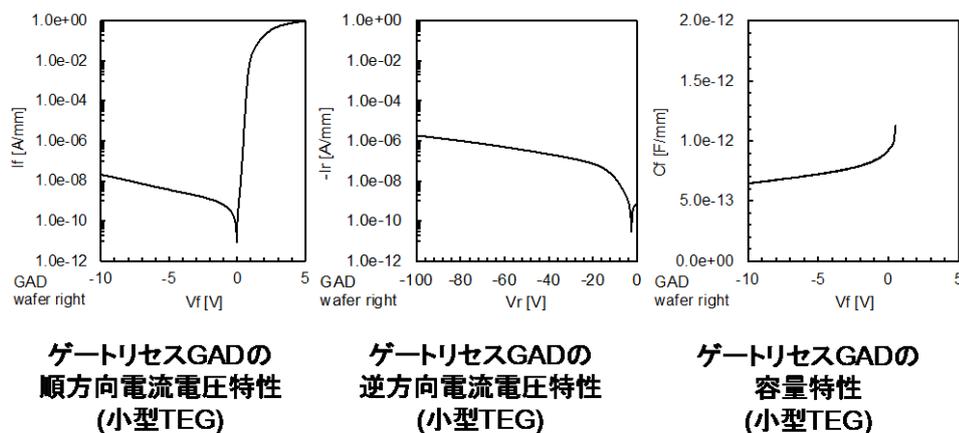
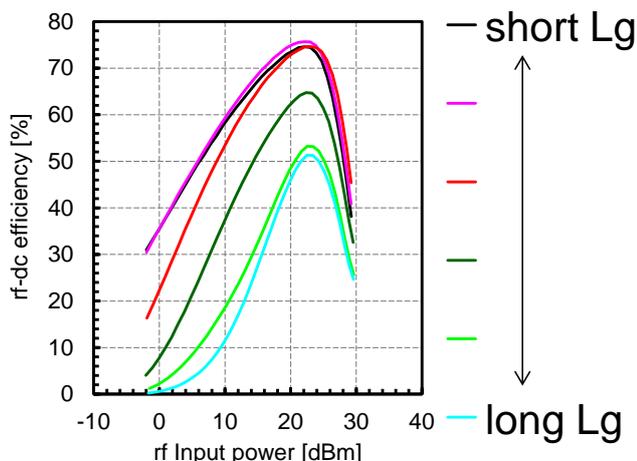


図 2-2-46 10W 級動作のための指標である、GaN-GAD の順方向電流特性、逆方向耐圧特性、容量特性（いずれも、10W 級動作のための指標を満たした）

- ・小型 TEG 素子による評価のため小電力ではあるものの、製造ラインで試作した素子の整流特性評価により 5.8GHz-to-DC 変換効率 75%を実証した。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術



大電流版GADのrf-dc変換効率
 (小型TEG)

図 2-2-47 小型 TEG 素子を用いた GaN-GAD の 5.8GHz-to-DC 整流特性検証

- ・また、実際に大電力動作させるための素子も製造ラインにて試作し、小型素子の特性をスケールアップした特性であることを確認できた。

10W級整流素子のためのダイオード特性

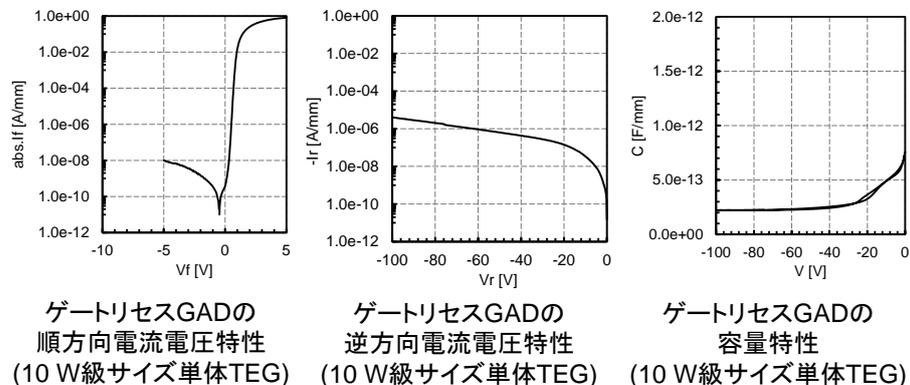


図 2-2-48 10W 級サイズのダイオード特性

(小型 TEG 素子のスケールアップした特性 (GaN-GAD の順方向電流特性、逆方向耐圧特性、容量特性) が得られることを確認)

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

(7) マイクロ波帯電力伝送システム基盤技術の開発 (B-②開発テーマ4)

本開発テーマでは、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、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を実施した。

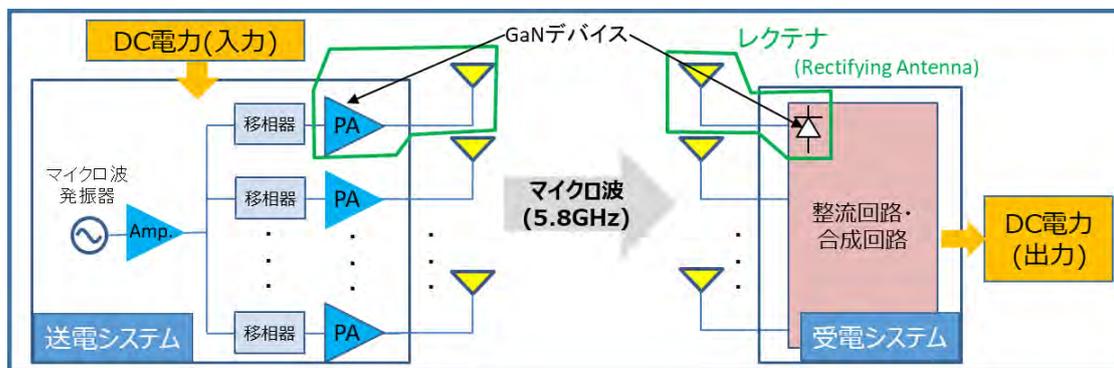


図 2-2-49 マイクロ波を用いた放射型ワイヤレス伝送システムの構成

【実施項目 1】 マイクロ波帯ワイヤレス電力伝送システムの開発
【達成目標】 5.8GHz 帯 10W 級受電システム用の送信パワーアンプ、低損失アンテナ一体化高効率 PIA 試作、性能実証。

- ・ 整合回路レス設計手法による高効率パワーアンプの実現：
 高調波反射機能内蔵アンテナ(実施項目 2)とパワーアンプを整合回路を用いることなく直接接続することで、10W 出力、総合効率 64%の高効率パワーアンプ並びに、パワーアンプ一体化高効率 PIA を実現した。

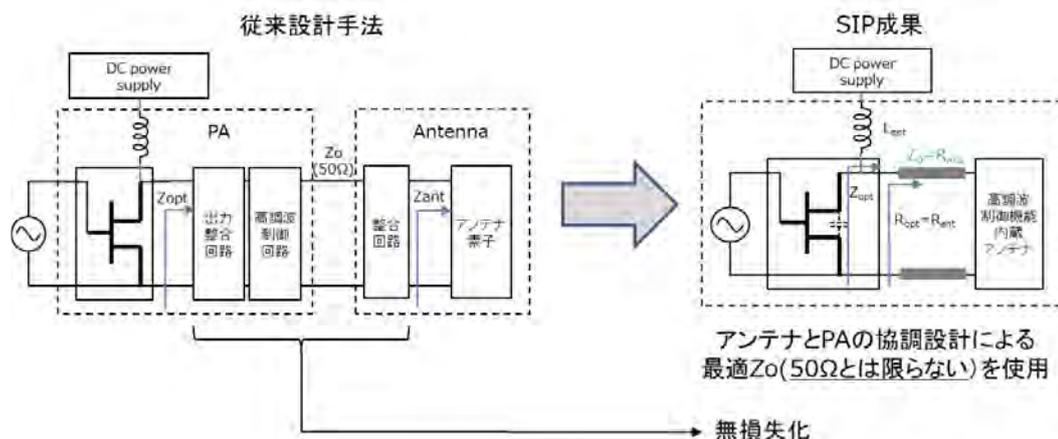


図 2-2-50 高効率 PA 一体型アンテナの設計手法概要

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

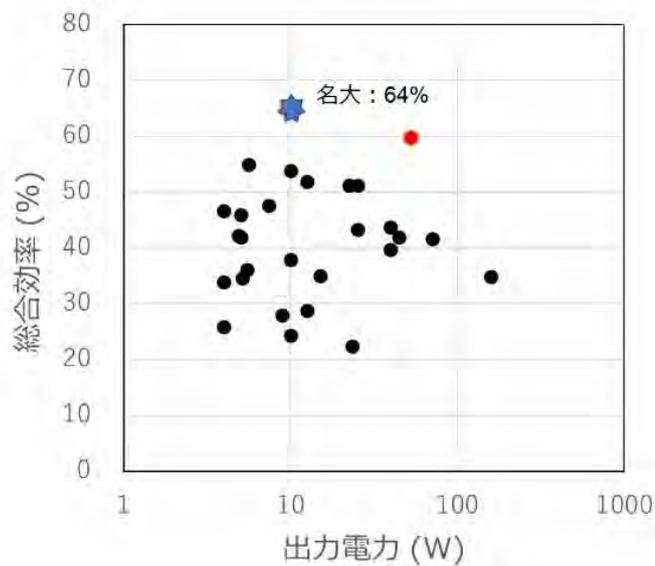


図 2-2-51 高効率 PA 一体型アンテナの設計手法概要

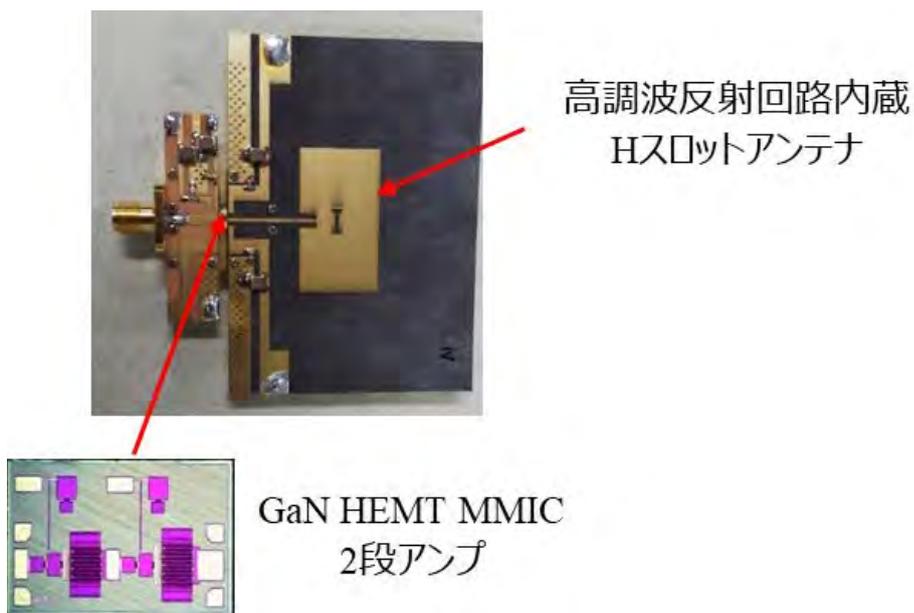


図 2-2-52 高効率 PA 一体型アンテナの設計手法概要

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 2】 マイクロ波帯ワイヤレス電力伝送用アンテナの開発
【達成目標】 5.8GHz 10W クラスマイクロ波帯電力伝送システム用低損失アンテナ設計、試作・評価による性能検証。

・ 5.8GHz マイクロ波帯電力伝送システム用低損失アンテナの設計、試作、性能検証：

2 倍波・3 倍波を処理できるアンテナを開発し、試作・評価を行った。
 3 倍高調波のみを処理するアンテナと 2 倍高調波のみを処理するアンテナに加え 2 倍高調波と 3 倍高調波を同時に処理できるアンテナを開発した。設計において固有モード解析を適用することにより、アンテナの動作原理・設計指針を明確にした。また、増幅器との一体化試験において、等価等方放射電力(EIRP)で 47W の出力を確認した。

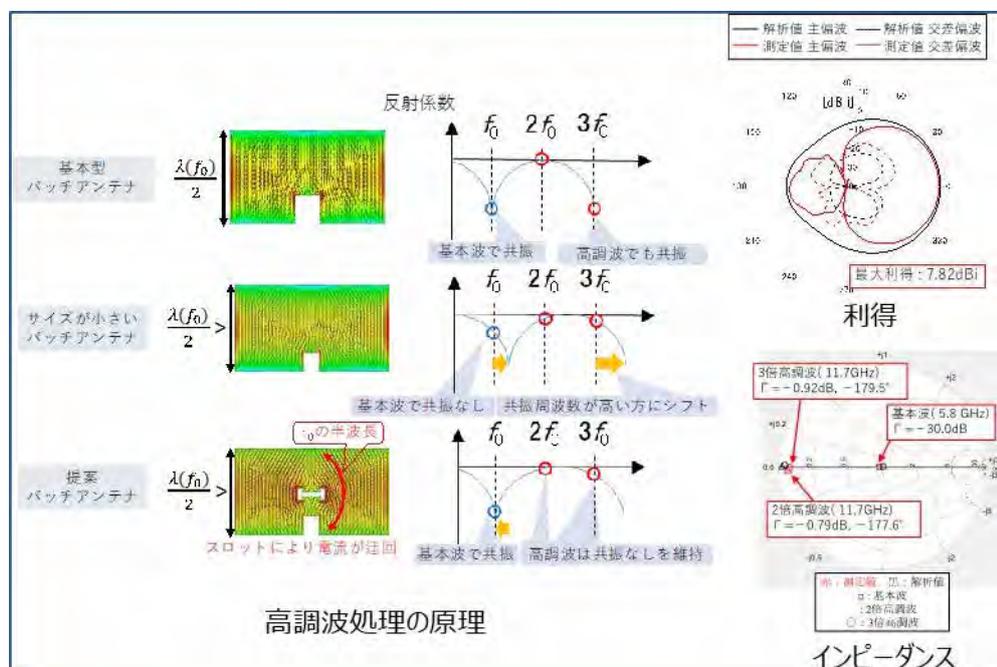


図 2-2-53 低損失かつ高調波の高反射機能を有する H スロットパッチアンテナ

【実施項目 3】 マイクロ波帯ワイヤレス電力伝送用受電レクテナの開発
【達成目標】 GaAs ePHEMT および GaN HEMT による 5.8GHz 帯 10W レクテナ設計、試作・評価による有効性実証。

・ ノーマリオフ FET で構成される Gated anode diode (GAD) による大電力レクテナの実現：

ノーマリ OFF 特性を有する GaAs EpHEMT により Gated Anode Diode (GAD) を構成した。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している。化合物半導体での大電力 GAD の実現は世界初の取り組み

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

みである。

GaAs SBD(耐圧 27V)と組み合わせ、5.8GHz 帯 1W レクテナを開発した。整流効率 92.8%@入力電力 1W は世界で断トツのトップ性能である。

また、ダイオード電流の飽和特性を考慮した GAD のゲート幅を決定する手法と、最終目標である GaN HEMT GAD による 10W レクテナに必要な回路設計技術を確立した。

5.8GHz 帯 10W 級整流器 IC を開発し、整流効率 71%@入力電力 16W が得られており、10W を越える整流器としてトップ性能である。



図 2-2-54 開発した 5.8GHz 帯 10W 級整流器 IC とその特性

- ・放熱機能を有する窒化アルミニウム・アンテナと GAD による大電力・高効率レクテナの実現：

実施項目 1 の高機能アンテナによる高効率化技術、実施項目 2 の GAD による大電力化技術を組み合わせて、大電力・高効率レクテナを実現した。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し、5W/10W 整流用 GAD をマウントすることでレクテナを作製した。十分な放熱特性を実現している。

5.8GHz 帯 GaAs5W レクテナでは整流効率 85%@入力電力 5W(測定値)、5.8GHz 帯 GaAs10W レクテナでは整流効率 78%@入力電力 10W(測定値)を得た。いずれも入力電力対整流効率のトレンドに対し、断トツのトップ性能である。大電力であるほど、回路損失の抑制効果が際立っている。

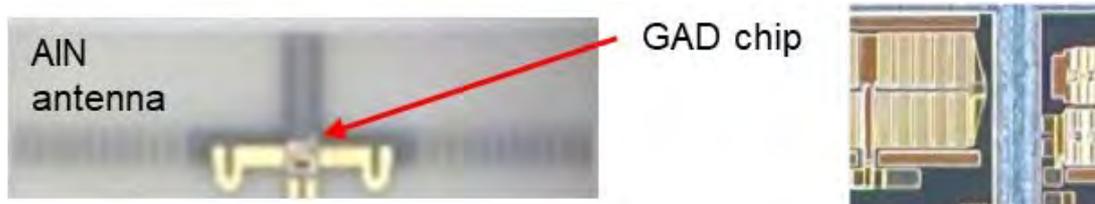


図 2-2-55 作製した 5.8GHz 帯レクテナ

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

【実施項目 4】 マイクロ波帯電力伝送システム基盤技術の開発
【達成目標】 マイクロ波帯電力伝送システムによる機能実証 (5.8GHz・10W 級)。

・開発テーマ 3 で開発の GaN HEMT と上記実施項目 1~3 の技術を組み合わせた大電力・高効率 GaN レクテナの実現：

GaN HEMT に実施項目 1 の高効率化技術、実施項目 2 の GAD による大電力化技術、実施項目 3 の窒化アルミニウム・アンテナによる放熱技術を組み合わせて、大電力・高効率レクテナを実現する。

レクテナ試作用ワイドリセス構造 GaN HEMT は 2022 年 10 月現在、製造中（三菱電機）であるが、製造過程の GaN HEMT の静特性、CV 特性を評価し（三菱電機）、整流効率をシミュレーションした結果、10W 入力時に 85% の整流効率を得ている。GaN HEMT 製造完了後、評価を実施する。

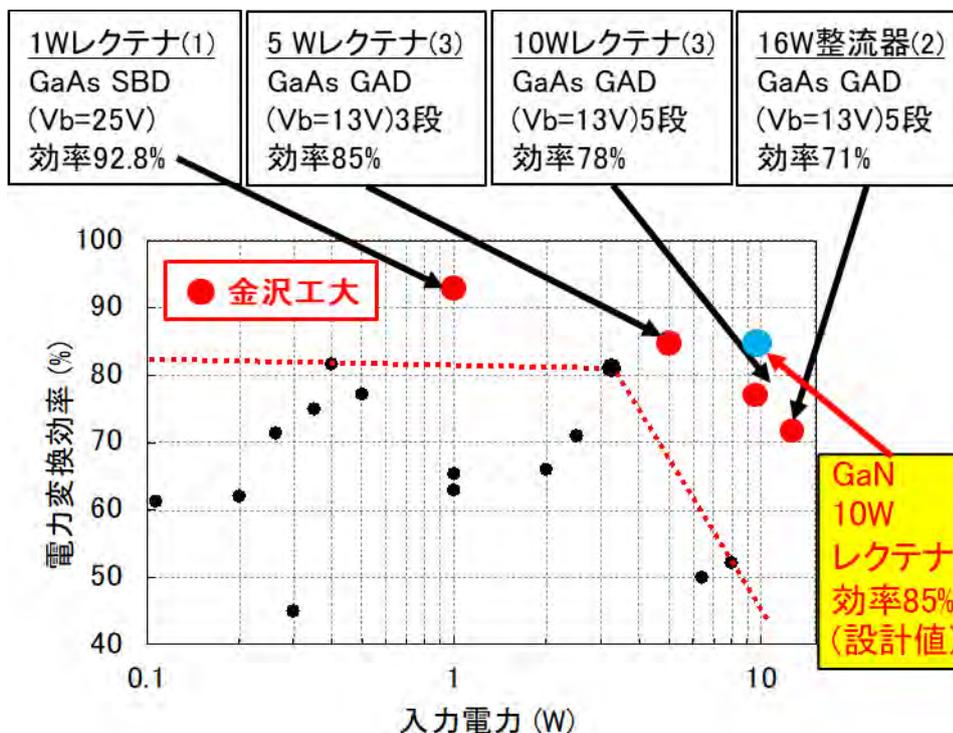


図 2-2-56 本テーマで開発した 5.8GHz 帯レクテナ・整流器の効率

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

④達成度 (2)： 社会実装の実現可能性

B-① エネルギー最適変換システムへの応用を見据えた基盤技術

＜社会実装に向けた具体的な計画＞

- ・本研究開発によって得られた USPM の要素技術、設計技術等はヘッドスプリング、富士電機で製品化に向けさらに開発を進める。そして各種規格に適合させ、蓄電装置や PCS に適用可能な USPM を製品化する。

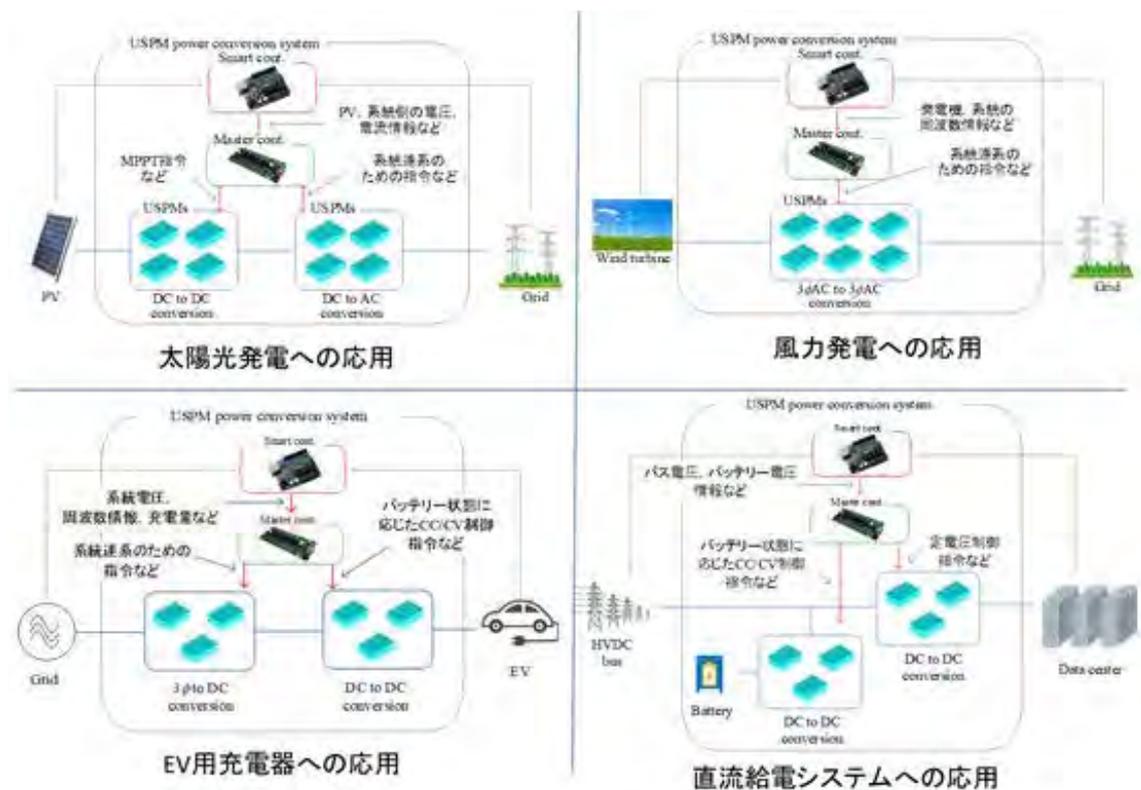


図 2-2-57 USPM の応用先例

- ・B-①(3)の研究の直接的な成果である縦型パワーMOSFETの事業化計画は以下及び図 2-2-58 のとおりである。

第 1 段階： 耐圧 600V の縦型パワーMOSFET の事業化 (2023~2024 年度)

第 2 段階： 耐圧 1200V の縦型パワーMOSFET の事業化 (2025~2026 年度)

事業化に先駆けて MOS 評価用ボードの販売とサンプル出荷を予定。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度
 (2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

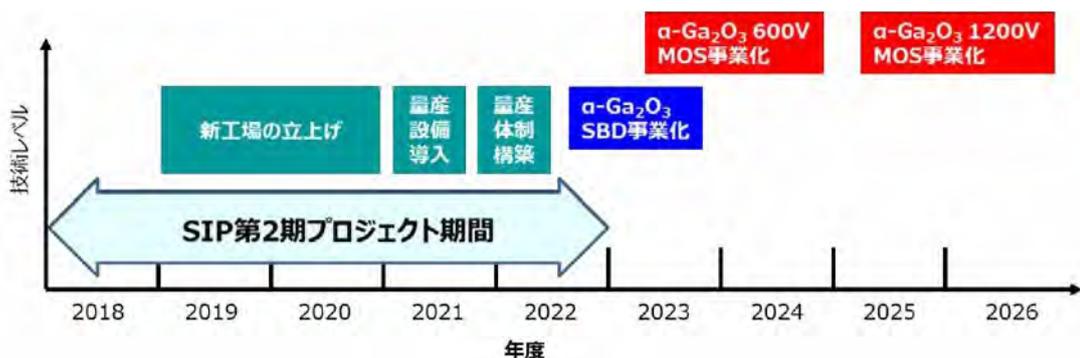
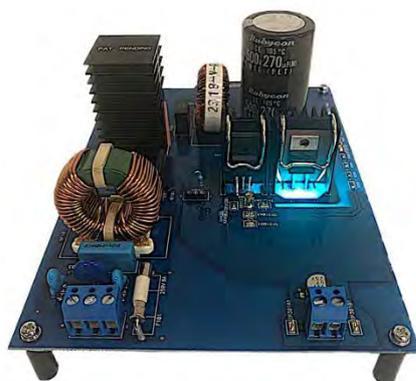


図 2-2-58 酸化ガリウム縦型パワーMOSFET の事業化計画

<計画進捗状況>

- ・2022 年度までに USPM の構成や特徴を明確化し、社会実装に向けた評価方法の具体化を実施した。また個別テーマごとの開発も 2022 年 10 月時点では全体として達成目標に到達していないものの、年度末までに各研究開発において実施すべき事項が明確化しており、達成目標に到達する見込みが既に得られている。また、USPM の製品化に向けて、USPM を用いた蓄電装置の開発を実施済みである。
- ・B-①(3)については、パワーMOSFET の前段階として 2022 年内に最初の SBD 事業化を計画しており、既に SBD 評価用ボードの販売 (2020 年～) とサンプル出荷 (2021 年～) を開始している (図 2-2-59)。



GaO® SBD評価用ボード
海外含め販売中
 最大360W出力のPFC電源ボード
 GaO® SBDを昇圧部に搭載



GaO® SBD
サンプル出荷開始
 耐圧：100～600V
 電流量：2～10A

図 2-2-59 SBD 評価用ボードと SBD サンプル

<上記社会実装に向けた体制構築状況と見通し>

- ・社会実装責任者 (詳細は「3 課題マネジメント」参照) を置いている B-

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

①(3)について、FLOSFIA 自社内での前工程量産を目的として、2019～2020 年に新工場の立上げ、2021 年に量産設備導入、2022 年に量産体制構築を実施した。

- ・2022 年 10 月 21 日には、京都府の西脇知事に工場や研究施設をご見学いただいた。
- ・ユーザーサイドの企業との連携、商社 2 社との販売代理店契約（2019 年）など、ユーザへの販売準備も進めている。複数の事業化パートナーと連携した幅広い応用展開を実現できるチームを編成している。
- ・量産規模を拡大するには、事業提携を通じて社外ファウンドリの既存半導体プロセスラインを活用する予定である。
- ・新材料での強力な知財網構築に成功している。

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

＜社会実装に向けた具体的な計画＞

- ・開発テーマ 1 と開発テーマ 2 で開発した MHz 帯 WPT 基盤技術の社会実装に向けたロードマップを図 2-2-60 に示す。
- ・開発テーマ 1 については、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、強力的に推進する。また、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からのフィードバックを得て改善を進める。
- ・縦型 GaN-MOSFET の社会実装責任者を富士電機株式会社に設置し、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る。
- ・開発テーマ 2 については、汎用の 13.56MHz 電力変換器/ゲート駆動 IC/電源システム/評価システムを開発し、産業機器分野での社会実装を図る。また、電気自動車用大容量ワイヤレス給電システムを開発し、工場内の AGV あるいは EV 車両への給電システムとして社会実装を図る。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

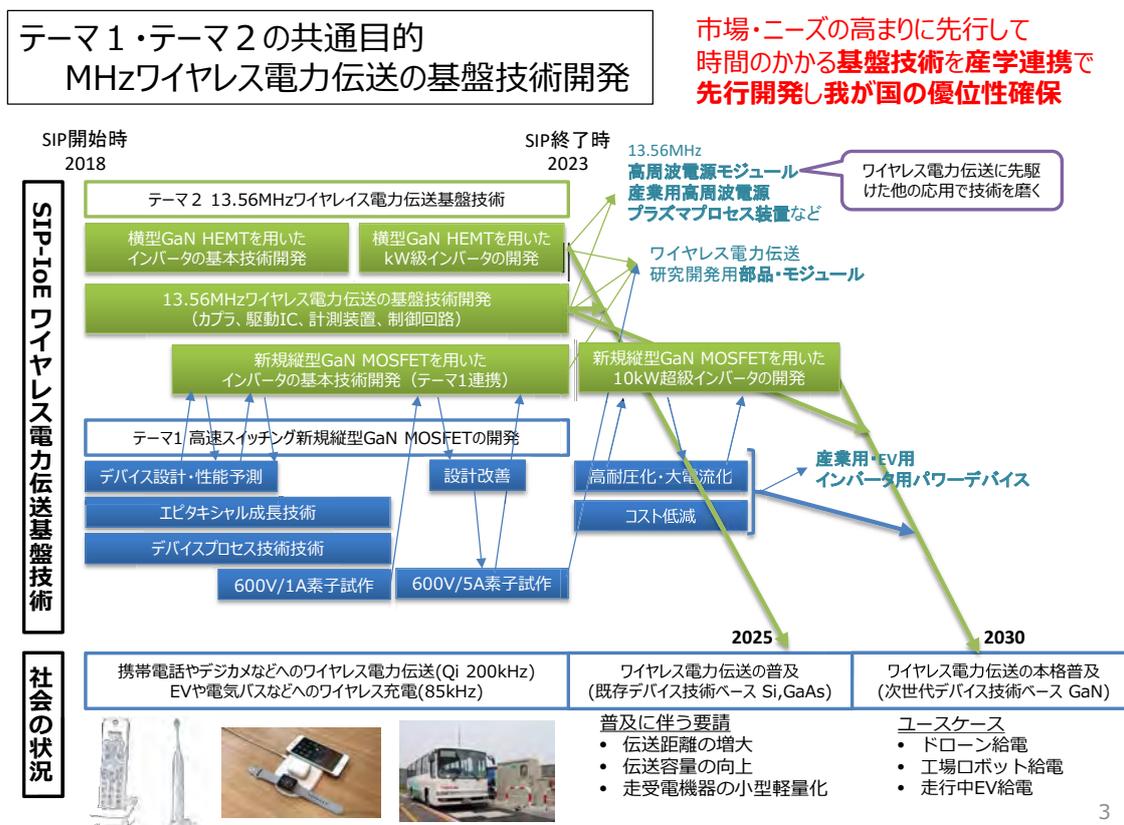


図 2-2-60 MHz 帯 WPT 基盤技術の社会実装に向けたロードマップ

- ・ 開発テーマ 3 と開発テーマ 4 で開発したマイクロ波帯 WPT 基盤技術の社会実装に向けたロードマップを図 2-2-61 に示す。
- ・ 開発テーマ 3 については、三菱電機(株)の製造ラインを用いたデバイス試作により、プロセスおよびデバイスの完成度を高める。また、ユーザとの議論を積極的に行い、潜在アプリケーションを抽出。そのアプリケーションに対するデバイス仕様の最適化を検討する。
- ・ 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し、実用化可能なデバイスの議論、ユーザニーズの具現化を並行して進める。
- ・ 開発テーマ 4 については、国内最大のマイクロ波の展示会・ワークショップで技術講演を行うとともに、学会/プレス発表等を活用し、中間成果段階からの事業化案件を抽出する。
- ・ 中間成果のプレス発表に対し問い合わせのあったメーカー 4 社（製造装置メーカー、高周波システムメーカー、電機メーカー）と、W（ワット）級給電システムに関する共同研究と社会実装に向けた検討を実施中である。
- ・ 最終製品をイメージしたパッケージ化/モジュール化の検討を行い、設計

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

技術と合わせて評価サンプルの提供も行えるようにする。そのためのベンチャー起業化検討も行う。

- ・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する。

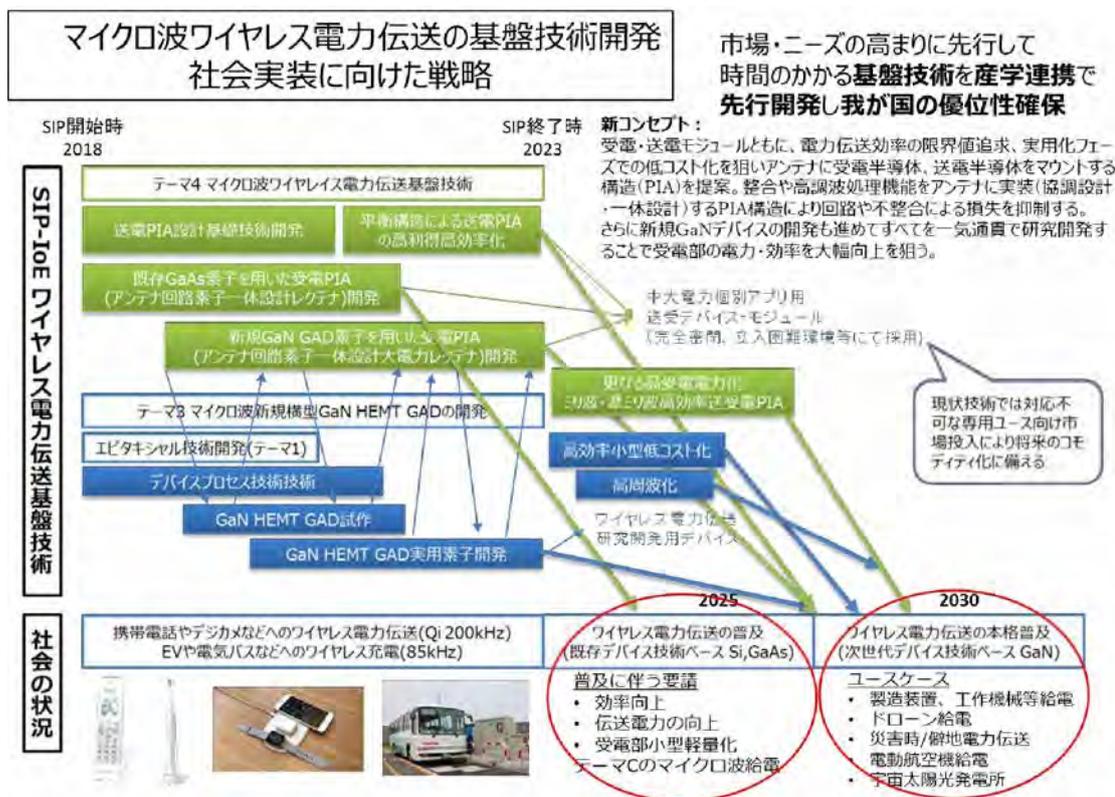


図 2-2-61 マイクロ波帯 WPT 基盤技術の社会実装に向けたロードマップ

<計画進捗状況>

- ・ 開発テーマ1については、縦型 GaN デバイスの構造最適化が進み、ある程度の歩留まりを確保可能なプロセス技術の見通しが立った。
- ・ 世界有数のパワーデバイスメーカーである富士電機(株)が参画し着実に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(株)と名古屋大学が共同で取り組んでいる。企業への移転はスムーズに進められる環境にある。
- ・ 開発テーマ2については、高周波駆動可能なゲート駆動 IC の商用化を視野に、基本仕様の最適化を検討中である。またインピーダンス計測システムの商用化を模索している。
- ・ 開発テーマ3については、提案する整流素子について、実動作によりその機能の実証が完了し、個別テーマ4と連携により、社会実装に向けた開発

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

の方向性も明確化された。

- ・三菱電機(株)の製造ラインを用いデバイス試作スルー工程(チップ個片化まで)を構築し、デバイス試作もほぼ予定通り開始した。
- ・GaNのノーマリオフHEMTを用いた整流素子のプレス発表を受け、2社からコンタクトがあり情報交換を開始した。今後継続的に議論を重ねることで合意しており、社会実装に向けた体制を検討する段階にある。
- ・今後の課題として、整流素子の特性再現性および信頼性の確認が未了である。この点は、企業の製造ラインで試作を行う中で検討していく。
- ・開発テーマ4については、中間成果のプレス/学会発表により、企業の関心が高まっている。現状、4社と共同研究を実施している。
- ・本研究で得た知見をもとに企業1社と5Gでの応用をターゲットとしたミリ波での無線電力伝送の研究を開始した。5Gへの無線電力伝送システムの組み込みが目的で、標準化を視野に入れて技術開発を実施中である。幅広い社会実装を狙っている。(国研)情報通信研究機構(NICT)のBeyond 5G研究開発促進事業に採択されている。
- ・テーマC-①屋外給電グループにはユーザが参画しており、意見交換の結果ニーズは多く、社会実装に対する確度は高いと考える。
- ・今後の課題として、大電力のマイクロ波電力伝送の標準化および制度整備は関係する各方面との調整が必要であり、その調整に時間を要する場合がリスク要因となる。

<上記社会実装に向けた体制構築状況と見通し>

- ・開発テーマ1については、名古屋大学に世界唯一ともいえるGaN縦型パワーデバイスの結晶成長からデバイス技術までの研究開発拠点が整備されつつある。本プロジェクト終了後、研究開発のプラットフォームとして、本格開発を実施する企業の利用が可能であり、プロジェクトの知見や技術が集積した試作環境が整う。
- ・EV用GaNMOSFETと連携し信頼性や生産技術、低コスト化技術などの開発を進め、2025年度までに目途をつける。
- ・中間評価における内閣府ガバニングボードからの指摘に対応し、縦型GaNMOSFETの社会実装責任者を富士電機(株)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。
- ・開発テーマ2については、名古屋大学とシャープ(株)との連携体制の構築は完了し、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予定である。

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)： IoE 共通基盤技術

- ・ 古河電気工業(株)と名古屋大学と(国研)産業技術総合研究所が連携し、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である。
- ・ 開発テーマ 3 については、製造ラインを用いたデバイス試作を行っているグループメンバーである三菱電機(株)含め、実用化可能なデバイスの議論は常時おこなっている。名古屋大学での試作から三菱電機(株)での試作への移行に関して、現状、特段の課題は認識していない。スムーズに移行できる予定である。
- ・ 中間評価における内閣府ガバニングボードからの指摘に対応し、横型 GaN ダイオードの社会実装責任者を三菱電機(株)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、実用化可能なデバイスの議論、ユーザーニーズの具現化等を並行して進めている。
- ・ 今後の課題として、マイクロ波の空間放射に関する電波法の規制をクリアする必要があり、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である。潜在アプリ開拓により、市場の早期立ち上げを後押しする必要がある。また、システム開発段階のユーザー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必要がある。

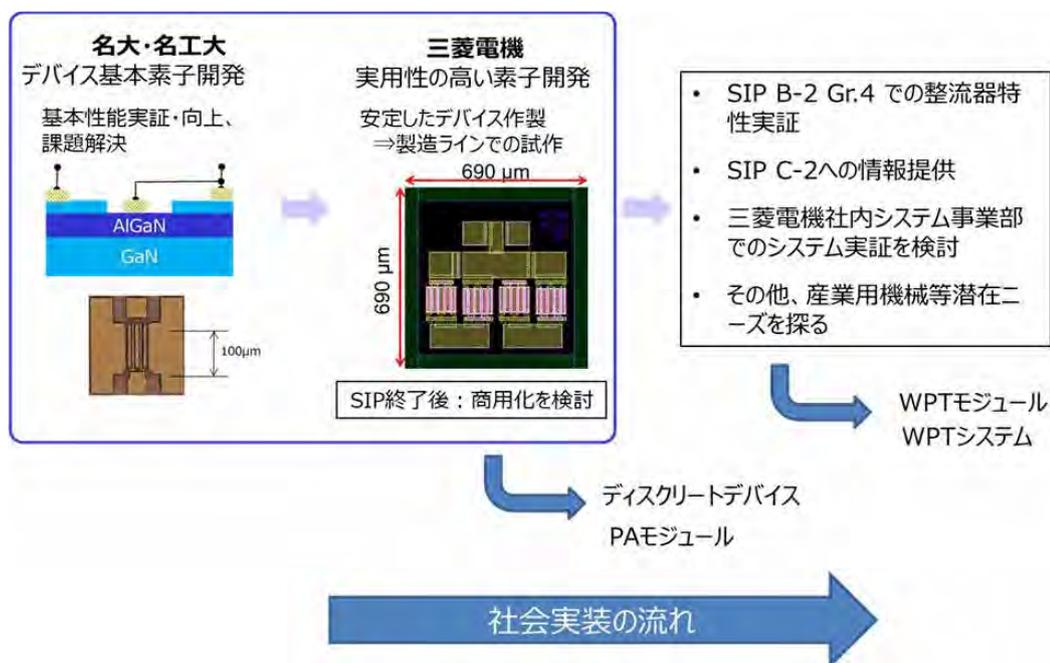


図 2-2-62 開発テーマ 3 の社会実装の流れ

- ・ 開発テーマ 4 については、電力伝送技術自体の確立は目標を達成する見

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

込みである。すでに複数の企業が興味を持っていることから、共同研究のフェーズに入ることにより、社会実装に向けた具体的な受け皿が形成されると考える。

- ・SIP 成果である 5.8GHz 帯 GaAs 整流器を、WPT システムメーカー(SIP 参画社含む)へ提供する体制を構築中である。参画機関である金沢工業大学から Third party(高周波機器メーカー)へ知的財産権を提供している。Third party がチップ製造(ファンダリィ)と後工程(外部委託)を行い、2023 年度後半を目処に WPT システムメーカーへ供給する予定である。5.8GHz WPT 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。また、将来の GaN 整流器普及に向けて市場立ち上げ前のエコシステムを構築する。

⑤知財戦略、国際標準化戦略、規制改革等の制度面の出口戦略

<制度面の戦略>

- ・USPM については、研究開発成果に基づき、産学官で連携し、技術規格の策定や国際標準化に向けた取組を実施する。電力変換器のモジュール化の研究開発は諸外国でも活発に進められており、今後、技術確立に向け、研究開発が加速することが予想される。本 SIP 研究の提案では、諸外国のような主回路モジュールだけでなく、ゲートドライバを含んだ超高速デジタルハードウェア技術と制御技術など、我が国における要素技術の優位性を活かした世界最高性能の USPM を開発し、世界に先駆けた USPM の有効性の実証・技術確立を行う。その結果、SIP 終了以降、技術規格の策定や国際標準化、デファクトスタンダードの先導を目指す。
- ・ α -Ga₂O₃については、ビジネスモデルを支える強力な知的財産網により、新規参入を阻止する。また、JEITA から IEC につながるワイドバンドギャップパワー半導体の国際標準化ルートを通じて、酸化ガリウムのエピ基板、パワーデバイスの評価方法について国際標準化を進めていくことを検討したい(評価方法が定まってくる MOS 事業化開始前後から取り組みを開始予定)。

<戦略に基づく成果>

- ・ α -Ga₂O₃については、特許出願件数 640 件以上、特許登録 230 件以上(海外含む)である。
ポイント 1：強い基本特許(”もの”の特許)が成立
ポイント 2：幅広い周辺特許により権利を強化
ポイント 3：グローバルでの権利化

2 各研究テーマの概要と課題目標の達成度

(2) 研究テーマ(B)：IoE 共通基盤技術

出願後 3 年以内のものも多く、権利の有効期間を最大限活用できる。また、知的財産権制度活用優良企業として平成 31 年度知財功労賞（経済産業大臣賞）を受賞した。

⑥成果の対外的発信／⑦国際的な取組・情報発信

国際会議への論文投稿および国際会議での発表、また海外ジャーナルへの積極的投稿を行い、本事業の成果の国際的な情報発信を実施した。以下にその他の取り組みの例を示す。

- ・ α -Ga₂O₃については、海外展示会への出展（PCIM Europe、2021 年 5 月）や海外を含めた α -Ga₂O₃ ダイオード搭載評価用ボードの販売などを通じて、海外ユーザとの対話により α -Ga₂O₃ パワーデバイスの需要・用途等の調査も実施した。
- ・ 酸化ガリウムトランジスタの研究成果が産業タイムズ社主催の「半導体・オブ・ザ・イヤー2020」半導体デバイス部門グランプリを受賞し、内閣府 SIP ホームページでも情報を発信した。
- ・ 2020 年 9 月に名古屋大学及び金沢工業大学より、GaN 整流素子、受電レクテナの研究成果をプレス発表した。同成果について内閣府からもプレスリリースを実施した。

表 2-2-1 テーマ (B) の対外的発信実績

| テーマ (B) | | 2018 年度 | | 2019 年度 | | 2020 年度 | | 2021 年度 | | 2022 年度 上期 | |
|----------------|----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------------|-----|
| | | B-① | B-② | B-① | B-② | B-① | B-② | B-① | B-② | B-① | B-② |
| 特許出願[件] | 国内 | 0 | 0 | 6 | 9 | 6 | 6 | 19 | 5 | 8 | 1 |
| | 海外 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 1 | 5 | 1 | 20 | 0 |
| 原著論文[報] | 国内 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0 |
| | 海外 | 0 | 0 | 4 | 7 | 10 | 6 | 10 | 8 | 2 | 4 |
| 学会等 口頭発表[件] | 国内 | 1 | 5 | 13 | 29 | 20 | 41 | 32 | 38 | 12 | 11 |
| | 海外 | 0 | 3 | 10 | 10 | 7 | 13 | 15 | 12 | 11 | 7 |