

採 択 番 号 02801

研究開発課題名 GaN 系真空マイクロフォトンクス技術による無線通信用ハイパワーテラヘルツ波発生に関する研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究は、通信用光電変換デバイスとしては初となる GaN 系材料での光電子を空間に放出・走行させる新たな光電変換デバイス構造を提案し、従来の概念を打ち破るハイパワーテラヘルツ波送信器の実現を目的とする。その実現のために、今や超高速フォトダイオードとして世界のデファクトとなっている日本発の UTC-PD の発明者・開発者、UTC-PD によるミリ波・テラヘルツ波発生の研究を行ってきた九州大学、ミリ波・テラヘルツ波新分野開拓の第一人者である大阪大学、半導体デバイス製造研究の拠点である産総研、NTT のデバイス設計技術を引き継ぐ早稲田大学に加え半導体フォトカソードで世界をリードする名古屋大学/PeS グループが分野を超えて力を合わせ、日本が得意とするフォトンクス技術において革新的なデバイスを創成・Beyond 5G 基盤技術を開拓していく。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人九州大学<代表研究者>  
国立研究開発法人産業技術総合研究所  
国立大学法人東海国立大学機構  
株式会社 Photo electron Soul  
国立大学法人大阪大学  
学校法人早稲田大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 134 百万円 (令和 5 年度 39 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 真空マイクロフォトンクスデバイス設計技術の研究開発

1-a) 真空マイクロフォトンクスデバイスグランドデザイン (国立大学法人九州大学)

1-b) 真空マイクロフォトンクスデバイス構造設計技術の研究開発 (学校法人早稲田大学)

研究開発項目 2 GaN 系真空マイクロフォトンクスデバイス実現技術の研究開発

2-a) GaN 系真空マイクロフォトンクスデバイス製造技術の研究開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

2-b) フォトカソード用 GaN 系材料技術の研究開発 (国立大学法人東海国立大学機構)

2-c) フォトカソードの性能評価及び機能性表面技術の研究開発 (株式会社 Photo electron Soul)

2-d) ミリ波・テラヘルツ波応用システムと社会実装技術の研究開発 (国立大学法人大阪大学)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	4	1
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	9	3
	その他研究発表	67	40
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	1	1
	受賞・表彰	4	1

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 真空マイクロフォトンクスデバイス設計技術の研究開発

1-a) 300GHz 帯アンテナを集積した InGaN 真空フォトダイオードの設計を完了した。設計情報をもとに産総研で InGaN 真空フォトダイオードの製造を実施した。製造した InGaN 真空フォトダイオードに 405nm 帯のレーザー光を照射し、フォトカソードからの電子放出によるフォトカレントを確認した。また並行して真空フォトダイオード真空評価装置を設計、構築した。さらに既存技術を活用し、 $10^{-5}$ Ps 級ガラス真空封止技術を用いた真空モジュールプロトタイプを完成させた。

1-b) 光電変換素子の周波数応答特性のシミュレーション環境を構築した。これを用いて GaN および InGaN 吸収層構造における周波数応答の構造依存性を明らかにし、300 GHz 超級の周波数応答のシミュレーションを進め、mW 級出力に向けた層構造および動作波長条件を示した。GaN 系真空フォトダイオードで初の高周波応答特性確認し、10mW 級 300GHz デバイスを設計した。

研究開発項目 2 GaN 系真空マイクロフォトンクスデバイス実現技術の研究開発

2-a) サファイア基板上的 InGaN の素子分離とコンタクト形成技術および、1 $\mu$ m 以下のキャビティ形成のための絶縁膜埋め込み/エッチングプロセスを新たに開発し、InGaN のマイクロフォトカソードにマイクロキャビティを介してアノード電極を形成した 2 端子素子化およびテラヘルツ波を放射するためのアンテナを実装したデバイスを完成させた。

2-b) フォトカソード用窒化物半導体材料として、In 組成 20%程度の InGaN : Mg サンプルを作製した。産総研でのデバイス作製上、低抵抗化が必要であることが判明し、下地 GaN への Mg ドーピングによる低抵抗化を図った。照射光パワー密度と引き出し光電流密度の相関を取得し、半導体フォトカソードとしては世界最高の光電流密度の最大電流密度 1400A/cm<sup>2</sup>を得た。

2-c) 2-b) でフォトカソード半導体材料として作成したアンテナを集積した真空マイクロフォトンクス光電変換デバイス (GaN 系真空マイクロフォトンクスデバイス) からの光電子放出特性を評価した。NEA 表面活性化過程でのセシウム蒸着と酸素供給に対する量子効率の増減の傾向は、半導体フォトカソードでの典型的な活性化過程と同様となった。さらに、活性化後のサンプル全体へ背面からレーザー照射し、量子効率のマッピング測定を行なった結果から、キャビティ構造中心の InGaN 露出箇所での量子効率が、周辺と比べて 20 倍程度高いことがわかり、明らかな NEA 状態の InGaN からの光電子放出を確認した。

2-d) 当該研究開発で試作するデバイスを評価するための光源システム (中心波長: 405nm) の構築を行った。単一波長可変光源とパルス光源を組み合わせることにより、ミリ波~テラヘルツ波搬送波に乗せたパルス信号を伝送できることを示した。また、応用システム開発の一環として、テラヘルツ波イメージングスキャナの被写界深度の拡大に関する検討と、ドローン搭載レーダの小型化・高速化の検討を行い、スキャン周波数 250Hz、移動ステージ速度 500mm/秒、被写界深度 170mm という世界最高性能を、ビームスポットサイズ 2 $\mu$ m で実証した。

## (8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

### 1 計画

デバイス実現と並行して、知財化マップをベースに特許出願を継続的に行い、引き続き主要国際会議で発表を行い、また応用システムでの使用を考慮してモジュール化することで、想定ユーザ（通信方式研究者、通信機器業界、通信事業者）への認知度を高めていく。今後、社会実装へ向けた研究とともに、想定ユーザとの共同研究・技術協力関係の推進、標準化のための内外との連携体制の構築、実用化に向けた研究開発継続のための資金確保、オープンイノベーションを押し進める。

### 2 展望

#### ・実用化へ向けての展望

通信用 300GHz 帯源は、CMOS での開発が進められているものの実用的な出力に達するには5年以上の期間が必要である。一方、化合物半導体ではすでに 300GHz に到達し一部市場に現れているが、課題は消費電力の大きさである。当面は電子デバイスでシステム検討が進められると考えられるが、実用化時には消費電力の課題を克服できる新技術が B5G 普及のカギを握る。本研究の真空デバイスがその候補の一つとなるには今後継続して研究を進めることが必要である。本研究を契機に材料・プロセス・評価・モジュール実装の一連の開発サプライチェーンが完成している。今後さらにメーカーとの協働体制・技術移行を開始し、システム研究へ継続的にサンプル提供できる体制を整えるとともに、量産の検討を進め、その後はメーカー独力での事業化をサポートしていく。生産ラインで製造したデバイスをシステム事業者における B5G 実用化研究に販売し、デバイスから装置、システムのサプライチェーンを確立し、2030 年ごろに想定される B5G システムへの本格導入を目指す。

#### ・標準化に向けた展開

デバイス設計技術、製造技術に関する知財は、デバイス普及のためのメーカーへの技術移行対象となるのでクローズとし、本デバイスの利用法、本デバイスを利用したシステム構成など、共有化可能な知財は開放して標準化の道を探っていく。