

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 Photoelectron 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 4 年度までの総額 95 百万円 (令和 3 年度 19 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 Photoelectron 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	0	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	3	3
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

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 帯で実現している平面スロットアンテナの 1THz 動作へのスケールダウンを行い、実際のデバイス構造と融合させた等価回路シミュレーションと電磁界シミュレーションによる最適設計を行った。

1-b) GaN 系材料のドリフト拡散モデルと真空領域の電子伝搬モデルを融合し、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。素子の吸収層厚及び真空領域厚依存性を解析し、300GHz 超級の周波数応答可能性を示した。真空中の空間電荷効果による出力飽和を含んだテラヘルツ波出力をモデル化し、テラヘルツ波出力の放射効率依存性の解析を進めた。

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) デバイス作製上の第一の課題であるデバイス構造内での空間構造を形成するためのプロセス基本技術を開発した。また、名大から提供された Sapphire 基板上的 InGaN 表面にマイクロオーダーのマイクロフォトンカソード光電子面を形成し、PeS にてフォトンカソード性能を評価した結果、適切な表面改質で InGaN マイクロフォトンカソードからの均一な光電子放出を確認した。

2-b) フォトン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 pss-Sapphire 基板および GaN 基板上へ作製した。10 枚程度のサンプルの作製を完了するとともに、InGaN 膜厚と転位の影響に関する量子効率への影響を調査し、量子効率の向上に成功した。

2-c) ターゲット真空マイクロフォトンクスデバイスのフォトンカソード半導体材料上の負の電子親和力状態の表面（機能性表面）に対して、放出面マイクロ化のサンプルを作成し（名大・産総研）、フォトンカソード性能評価装置を用いて清浄・機能性表面化の条件出しを行った。また、フォトンカソード性能評価装置への半導体表面の清浄化技術導入として、機能性表面の阻害要因である炭素化合物を除去する酸素プラズマクリーナーの組込み改良を完了した。

2-d) 当該研究開発で試作するデバイスを用いたミリ波・テラヘルツ信号発生システムの開発に先駆け、短波長（波長：～400nm）で動作する光信号生成・変調システムの構成を調査した。また、ドローン搭載型レーダへの応用を想定し、計測時間の短縮化（数秒から数ミリ秒に短縮）に対する実験的検討を行なった。

(8) 今後の研究開発計画

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

ハイパワーテラヘルツ波源への適用を目指し、テラヘルツ級の周波数応答を可能とする自由空間電子走行領域を備えた光電変換デバイスを設計・評価する。本研究題目は、高出力ミリ波・テラヘルツ波ビーム源の実現に向けて、テラヘルツ級の周波数で動作する光電変換デバイスの実現を目標とし、自由空間の電子走行を用いた真空マイクロフォトンクス光電変換デバイスの設計と特性評価

を行うものである。既存フォトダイオードにおいて周波数応答を律速するキャリア走行時間の改善に着目し、自由空間内の電子走行を採用する。UTC-PDにおける電子走行帯域が電界に対して飽和するのに対し、自由空間伝搬構造は電子速度の飽和が抑制され、高周波発生源の大幅な出力改善が見込まれる。素子設計に当たっては、GaN系半導体フォトカソード材料の電子親和力の状態を勘案し、新たなバンドエンジニアリングに基づいたデバイスのモデリングとシミュレーションを行う。今年度までに、GaN吸収層を用いた光電変換素子の300GHz級の周波数応答可能性を示し、NEA化による電子放射効率の改善による、テラヘルツ波の高出力化に対する見通しが得られた。今後、試作構造における周波数応答および出力を見積もり、解析モデルの高度化により出力特性の定量的予測を可能とする。吸収層構造設計による特性改善を進め、InGaAs系光電変換素子に対する優位点を定量的に明らかにしていく。さらにフォトミキシングで用いる400nm帯光源の構築も行う。

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

真空マイクロフォトンクス光電変換デバイスの要素技術である光電効果を検証するためのプロトタイプ構造を作成し、エミッター構造の最適化を行う。GaN系半導体カソードから、金属電極までが自由空間電子走行距離となり、電子平均自由行程は真空度に依存することから、電子放出率は電界、走行距離、真空度に依存する。ギャップ構造から形成された真空空間で電子の自由走行性能を、九大、名大、産総研およびPeSと共同して確認し、デバイス構造設計と構造最適化を押し進める。さらに、電子を引き出すためのゲートや、MIS構造化することで、放射効率の増大を狙う。真空マイクロフォトンクスデバイスからの要求仕様の顕在化と仕様を満たす半導体フォトカソード材料の設計と作製を行い、評価結果を設計にフィードバックし最適な半導体の材料条件を見出す。さらに半導体フォトカソードの真空フォトンクスデバイス化に必要な構造と半導体材料の条件を擦り合わせてインテグレーション可能な半導体フォトカソードの実現まで行う。半導体フォトカソード上の機能性表面である負の電子親和力状態（Negative Electron Affinity, -NEA-）の活性化手法およびシステム開発として、半導体フォトカソードの真空フォトンクスデバイス化に向けた擦り合わせ・インテグレーション技術に適した機能性表面の活性化とシステム条件を見出す。実現したデバイスを用い、従来技術よりも2桁以上の出力の光電変換デバイスがもたらす、新たなミリ波・テラヘルツ応用システムを開発し、早期の社会実装を目指す。