

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 4 年度までの総額 95 百万円 (令和 4 年度 76 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	1	1
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	6	6
	その他研究発表	31	27
	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	4	4

(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。

1-b) GaN 系光電変換素子の層構造設計を進めた。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 超級の周波数応答可能性を示した。また、試作構造を勘案したテラヘルツ光出力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。

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) 前年度は、InGaN のマイクロフォトカソード光電子面を形成し、光電子放出を確認したが、今年度は、その光電面を利用した InGaN 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プロセスの開発を実施した。サファイア基板上の InGaN の素子分離とコンタクト形成技術および、1 μ 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、デバイス構造作成が完了した。

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。また、光電流密度 1.4kA/cm²を達成し、本フォトカソード材料の性能を確認した。

2-c) 2-b)でフォトカソード半導体材料として作成したサンプルに対して、量子効率と耐久性の観点で NEA 表面性能に適したビーム生成および表面処理の条件探索として、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、最大電流密度 1400A/cm²を得た。これは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達成となった。更に、その耐久性評価においても、光電流 (1000A/cm²) の連続放出時間 80 時間以上も達成した。一方で、本結果からは放出光電流 10mA を実現するためには放出面サイズがおおよそ直径 35 μ m 程度必要となるため、本課題の最終目標を達成するためには更に光電流の放出面サイズを 1/3 以下に小さくする必要があるという課題が明らかになった。本課題は、一桁以上高い光出力の励起光源を用いることが可能であるため十分解決可能である。

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・高速化の検討を行った。

(8) 今後の研究開発計画

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

これまでに確立した GaN 系真空フォトダイオードのモデルの改良および詳細設計をさらに進め、試作素子の基本特性評価から、最終目標である mW 級出力テラヘルツ波源を実現する。具体的にはデバイス内部での光電変換効率、電子走行、キャパシタンスによる時定数、アンテナから見たインピーダンス、アンテナ特性、アレーによる指向性、そしてこれらの製造技術を全て考慮した、電磁界解析、熱伝導解析、等価回路シミュレーションを駆使した全体最適化を行う。特にアンテナ設計では、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り最適設計を行う。

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

これまでに見出した最適な半導体の材料条件と、半導体フォトン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を用いて、真空フォトダイオードの実現を目指す。エピ基板を名大にて作製し、産総研においてゲート型真空光電変換デバイスを作製した後に PeS において動作確認を行っていく。光変換時の量子効率向上、半導体の低抵抗化の課題を解決するための素子構造の最適化を目指す。具体的には、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確認し、さらなるデバイス構造最適化を推し進める。さらに、GaN 基板上へ GaN/p-InGaN 素子の作製を行うために、厚膜 p-GaN 層を GaN/InGaN 界面に導入し、コンタクト抵抗改善のためのコンタクト層へのドーピング化の最適化を実施する。

真空フォトダイオードとして電極等をカソード半導体にパターンニングしたサンプルに対して、機能性表面である負の電子親和力状態の活性化を行い、高い性能（量子効率や電流、耐久性）に適した金属材料やそのパターンニング条件を見出す。

光源開発として、半導体材料のバンドギャップに調整した従来の波長（405 nm = 3.0 eV）より更に短波長化（<390 nm = 3.2 eV）することで、真空準位より更に高いエネルギー領域へ電子を励起する利点を高耐久化に利用する。そのために、短波長（365~390nm）のレーザーダイオード光源を用いて光電子ビーム生成を行い量子効率や電流、耐久性評価を行い、短波長化の高性能化の利点を確認する。

社会実装へ向けた GaN 系デバイス評価のために、狭線幅波長可変光源と、直接変調が可能な CW 光源を組み合わせ、変調されたミリ波~テラヘルツ波を生成する。受信系には、従来のミリ波・テラヘルツ波検出器を用いる。伝送実験を通して、GaN 系真空フォトダイオードの安定性を評価する。実システム応用に関しては、ドローンに高出力の無線送信機を搭載し、映像伝送をデモンストレーションする（1.55 μm 帯の部品・システム技術を用いた実験）。