

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆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
- ◆受託者 (大)九州大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、(大)東海国立大学機構、(株)Photo electron Soul、(大)大阪大学、(学)早稲田大学
- ◆研究開発期間 令和3年度～令和5年度(3年間)
- ◆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)

## 2. 研究開発の目標

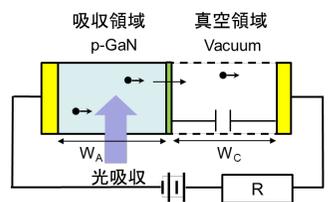
通信用光電変換デバイスとしては初となるGaN系材料での光電子を空間に放出・走行させる新たな光電変換デバイス構造を提案し、従来の概念を打ち破るハイパワーテラヘルツ波送信器の原理確認動作を令和5年度までに実現する。

## 3. 研究開発の成果

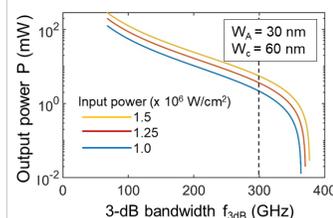
### 研究開発項目1: 真空マイクロフォトンクスデバイス設計技術

研究開発目標

周波数応答およびTHz出力シミュレーションにより300-GHz級のTHz光出力を確認



素子構成



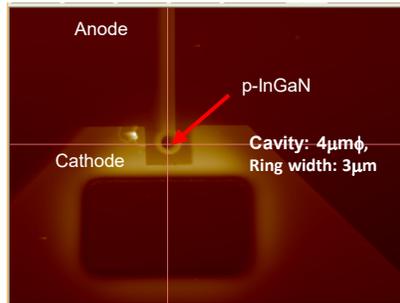
出力の帯域依存性

### 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

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真空フォトダイオードプロトタイプが完成



InGaN/サファイア基板上の真空フォトダイオードアレイ



フォトカソード部の電子顕微鏡像

研究開発成果

#### 研究開発項目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

300GHz帯アンテナを集積したInGaN真空フォトダイオード設計完了。InGaN真空フォトダイオード製造実施。405nm帯レーザー照射で電子放出によるフォトカレントを確認。

#### 研究開発項目1-b) 真空マイクロフォトンクスデバイス構造設計技術

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、300GHz超級の周波数応答可能性を明確化。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抽出。

#### 研究開発項目2-a) GaN系真空マイクロフォトンクスデバイス製造技術

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端子素子化のデバイスプロトタイプ。InGaNの素子分離とコンタクト形成技術および、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開発によりデバイス構造作成が完了。

#### 研究開発項目2-b) フォトカソード用GaN系材料技術

フォトカソード用窒化物半導体材料として、InGaN:Mgサンプルを作製。下地GaNへのMgドーピングによる低抵抗化を実施。また、1.4kA/cm<sup>2</sup>の光電流密度を達成し、本フォトカソード材料の性能を確認。

#### 研究開発項目2-c) フォトカソードの性能評価及び機能性表面技術

フォトカソードへの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最大電流密度1400A/cm<sup>2</sup>を達成。さらに連続放出時間80時間以上の耐久性も達成。一方、光電流10mAを実現するための放出面サイズを明らかにし、励起光源強度増加により実現可能であることを明確化。

#### 研究開発項目2-d) ミリ波・テラヘルツ波応用システムと社会実装技術

光源システム(中心波長: 405nm)を構築。ミリ波～テラヘルツ波搬送波に乗せたパルス信号の伝送可能性を明確化。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と、ドローン搭載レーダの小型化・高速化を検討。

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
1 (1)	0 (0)	6 (6)	31 (27)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (4)

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

(1)内外の学会発表で4つの賞を受賞

- 2022年9月 4日 レーザー学会九州支部 優秀研究賞
- 2022年9月 6日 電子情報通信学会 エレクトロニクスレーター論文賞
- 2022年9月 28日 27th Microoptics Conferece Best Paper Award
- 2023年1月 10日 電子情報通信学会九州支部 連合大会講演奨励賞

(2)著名研究者で構成するアドバイザリ委員会を実施

アドバイザリ委員

- ◆目黒 多加志 教授 (東京理科大学)
- ◆石川 史太郎 教授 (北海道大学)
- ◆片山 竜二 教授 (大阪大学)
- ◆石橋 忠夫 氏 (Wave Packets社代表、IEEEフェロー、応用物理学会フェロー、電子情報通信学会フェロー)

5. 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

自由空間電子走行領域を備えた光電変換デバイスの設計・評価

- ◆Ga<sub>N</sub>系真空マイクロフォトンクスデバイス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
- ◆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 Ga<sub>N</sub>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

光電変換デバイス構造の試作と最適化

- ◆最適な半導体の材料条件と、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う
- ◆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
- ◆Ga<sub>N</sub>基板上へGa<sub>N</sub>/p-InGa<sub>N</sub>素子の作製を行うために、厚膜p-Ga<sub>N</sub>層をGa<sub>N</sub>/InGa<sub>N</sub>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
- ◆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
- ◆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

真空マイクロフォトンクスデバイスを用いたシステム開発

- ◆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
- ◆伝送実験を通して、Ga<sub>N</sub>系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