

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ニ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、(国研)産業技術総合研究所、(大)東海国立大学機構 名古屋大学、(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5年度までの総額134百万円(令和5年度39百万円)

2. 研究開発の目標

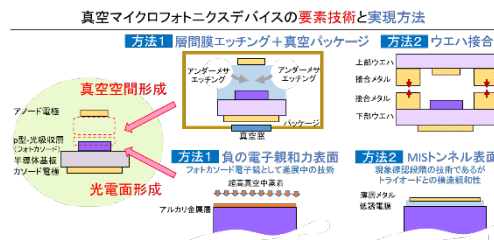
通信用光電変換デバイスとしては初となるGaN系材料での光電子を空間に放出・走行させる新たな光電変換デバイス構造を提案し、従来の概念を打ち破るハイパワーテラヘルツ波送信器の原理確認動作を令和5年度までに実現する。

3. 研究開発の成果

研究開発項目1: 真空マイクロフォトニクスデバイス設計技術

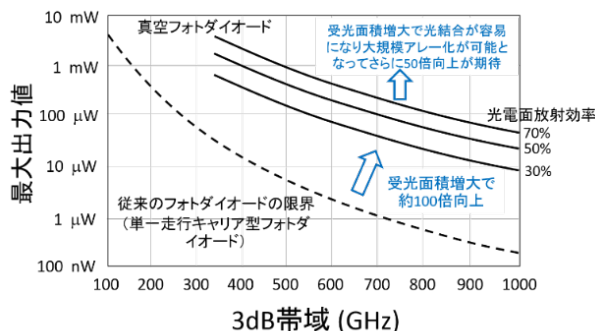
研究開発目標

真空空間形成法として、層間膜エッチング法とウエハ接合法を検討する。光電面形成法として、CsO処理による機能性表面、MIS構造の効果を確認し、新フォトダイオードに適した構造を決定する。



デバイス作製技術

半導体よりも誘電率が低い微小空間(真空)を電子走行層として用いることで、同じキャパシタンスのフォトダイオードよりも面積を10倍以上大きくでき電流量が10倍以上向上する。(放射電界、放射磁界ともに電流に比例することから電磁波パワーは電流の二乗に比例し)高周波出力強度は100倍以上の増大が可能となる。これら初期計算結果と、真空フォトダイオードの動作特性を高精度で予想する。



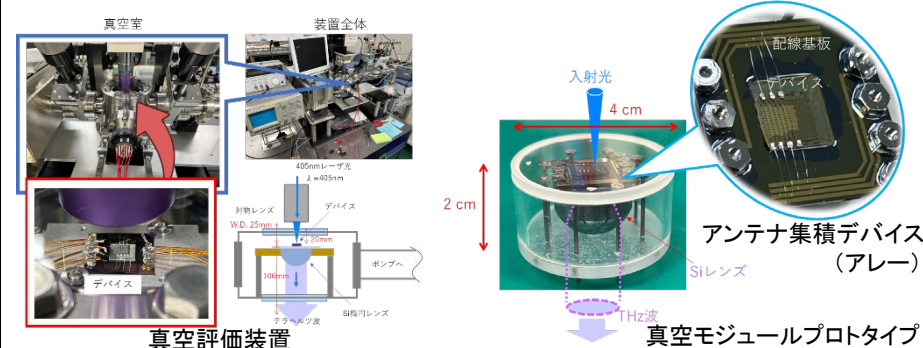
出力と動作周波数のトレードオフ

上記光電効果と真空技術の進展度の見極めおよび両者の関係を明らかにし、2023年度末までに基本構造の体系化、権利化を行い本研究の技術基盤を構築する。

研究開発成果

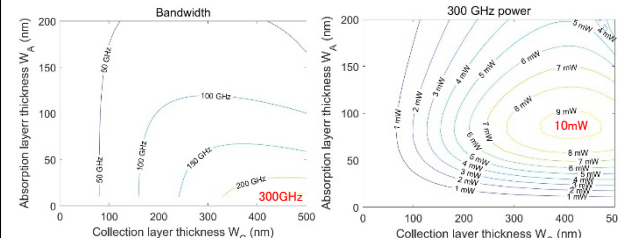
研究開発項目1-a) 真空マイクロフォトニクスデバイスグランドデザイン

300GHz帯アンテナ集積デバイスを設計し、製造チーム(名大、PeS、産総研)で試作。真空評価装置を設計、構築。真空モジュールプロトタイプを完成。テラヘルツ波出力未確認、真空装置からのテラヘルツ波取り出しが今後の課題。



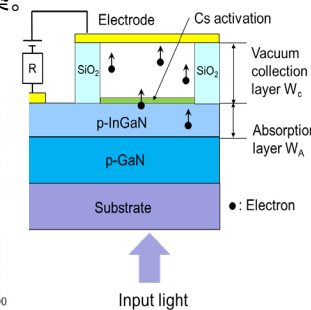
研究開発項目1-b) 真空マイクロフォトニクスデバイス構造設計技術

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構築。GaN系真空フォトダイオードで初の高周波応答特性確認。10mW級300GHzデバイスの設計を完了。



動作周波数帯域

出力



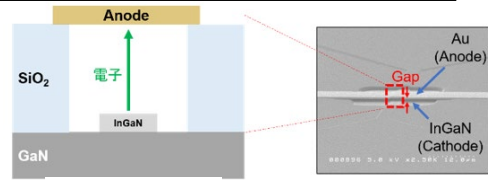
シミュレーションモデル

3. 研究開発の成果(続き)

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

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

層間膜エッチング法を用いて、デバイス構造内に電子走行させるサブミクロン厚空間を形成するプロセス基本技術を開発した。さらに、微細加工を施したウエハどうしの新規ウエハ接合法を確立する。



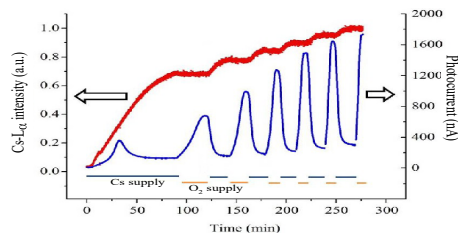
デバイス構造 層間膜エッチングによるプロセス検討用デバイス

研究開発項目2-b) フォトカソード用GaN系材料技術

InGaNフォトカソード形成に特化した結晶成長技術を開発し、高い量子効率と高耐久を兼ねる半導体フォトカソードを実現する。

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

NEA表面成立の鍵となる表面原子の配列や局所構造、層構造及び吸着・化学状態を多角的な表面観測手法を用いて明らかにし、高量子効率かつ高耐久な機能性表面を提供する処理方法を確立する。



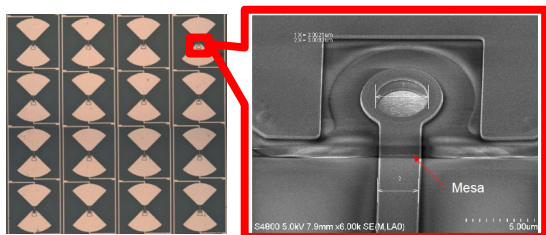
右図)半導体フォトカソードの機能性表面過程中の、光電流とセシウムX線蛍光収量の変化

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

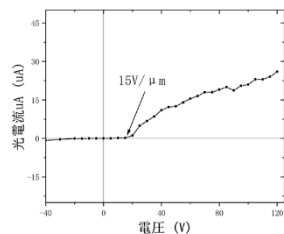
300GHz帯において非圧縮2/4K/8K映像(1.5~24 Gbit/s)のリアルタイム伝送等を行い、新規開発のフォトダイオード技術の実用性を実証する。また、ドローン搭載型応用機器のシステム開発を行い、本研究開発の価値とインパクトを実証する。

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

デバイス構造内での空間構造を形成するための層間膜エッチング法のプロセス基本技術を開発。作製したデバイスの電圧-電流特性を評価し、真空フォトダイオードとしての動作を示唆する特性を確認した。



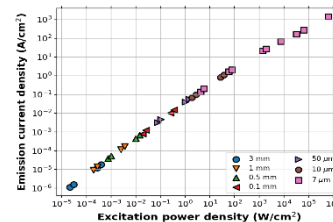
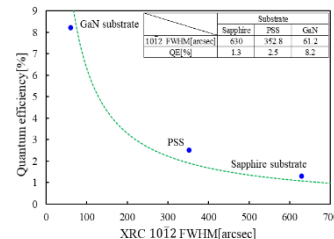
作製したアンテナ集積デバイス



真空フォトダイオード動作を示す電圧-電流特性

研究開発項目2-b) フォトカソード用GaN系材料技術

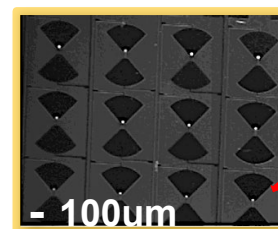
InGaN:Mgサンプルをpss-Sapphire基板およびGaN基板上へ作製。デバイス用基の作製とともに、InGaN膜厚と転位の影響に関する量子効率への影響を解明。



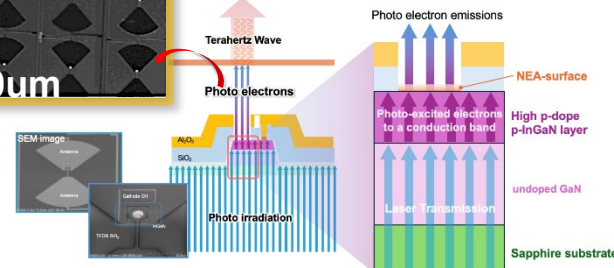
各基板材料の量子効率のX線ロッキングカーブ半値幅依存性

InGaNフォトカソードからの光電流密度のレーザパワー依存性

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



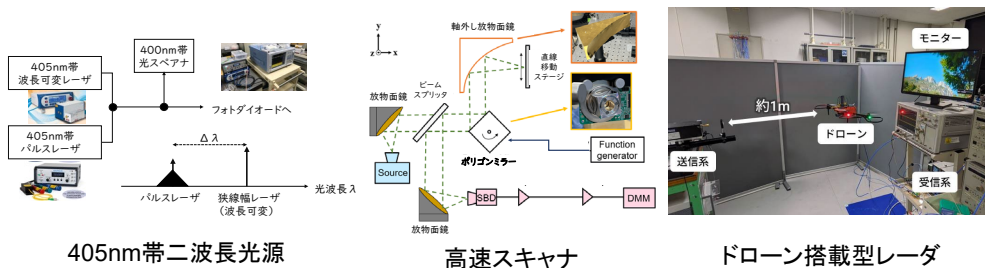
- ・最大電流密度1400A/cm²の光電流の生成に成功。GaAs半導体フォトカソードを二桁上回る世界最高電流密度。
- ・光電流30uAで925時間の連続サイクル駆動を達成。
- ・アンテナ集積型デバイスから光電子放出を達成。



デバイス全景(左)とフォトカソード部断面図(右)

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

短波長(波長: 405nm)動作の光信号生成システムを構成。社会実装に向けた応用システムとして高速スキャナ、ドローン搭載型レーダを開発。



405nm帯二波長光源

高速スキャナ

ドローン搭載型レーダ

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	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
4 (1)	0 (0)	9 (3)	67 (40)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	4 (1)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

(1) 権利支援を活用し、毎月知財化アドバイザと打ち合わせ、知財マップを作成し、特許1件出願

(2) 成果を積極的に発信し、計画を大きく上回る43件の論文発表、口頭発表を実施

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- ・実用化へ向けての展望
 - ◆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する。
 - ◆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。
- ・関連する研究への貢献
 - ◆本研究開発で実現する真空フォトダイオードは、高周波無線通信の基本デバイスであるため、その用途は極めて広く、まだ気が付いていない展開の可能性が大きい。実際にセンシングやイメージング用途での活用の可能性の問い合わせを受けるなど、低消費電力性だけにとどまらず関連する研究を加速する潜在能力を秘めている。
 - ◆現在顕在化しているユーザと情報交換をしながらデバイス要求性能を精緻化し、あわせて国際会議、展示会、ニュースリリースを積極的に活用して潜在ユーザの探索を続けていき、常にサンプル提供できる体制を作っていく。
- ・新たな研究開発の展開
 - ◆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
 - ◆本研究開発を通じて構築した異分野にわたる材料研究者・プロセス研究者・デバイス研究者・システム研究者の連携体制はさらなる新技術創成の力を持っている。
 - ◆現在、真空トランジスタの創成に向けて科研費などの研究資金獲得活動を始めており、それが実現できればB5G普及フェーズにおける通信技術の一層の高度化、低消費電力化に貢献するだけでなく、新たな産業のシーズとなる。