

令和 7 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 24301
研究開発課題名 超広帯域光信号計測・実装技術の研究開発
副 題 200GHz 級超広帯域光電変換デバイスと高精度計測・実装基盤の研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究は、200GHz 級超広帯域光電変換デバイスと 0.5mm コネクタを統合した世界初の評価系からなる DC から 200GHz に至る超広帯域信号を対象とした計測技術および高周波・広帯域デバイスの実装技術を開発し、光と無線の融合を含む次世代通信基盤を支える実装・評価プラットフォームを確立することを目的とする。

具体的には、温度安定性および耐雑音性に優れた 200GHz 級光電変換デバイスと、0.8mm および 0.5mm の新規コネクタ規格を適用した実装技術を開発する。あわせて、220GHz まで対応する高精度な計測・校正技術を確立し、110GHz 以下で誤差 1dB 以下、200GHz 帯で誤差 2dB 以下の精度を持つ精密評価基盤を実現する。

(2) 研究開発期間

令和 7 年度から令和 9 年度 (3 年間)

(3) 受託者

学校法人早稲田大学<代表研究者>
住友大阪セメント株式会社
デクセリアルズ株式会社
株式会社ワカ製作所

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 7 年度から令和 8 年度までの総額 200 百万円 (令和 7 年度 100 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 超高速・広帯域信号計測技術の研究開発

- 1-1 a) 200GHz 級 EO 変換デバイス技術の開発 (住友大阪セメント)
- 1-1 b) 200GHz 級 OE 変換デバイス技術の開発 (デクセリアルズ)
- 1-1 c) 200GHz 級光・電気信号の帯域分割精密測定および計測技術の開発 (早稲田大学)
- 1-2) マルチコアファイバ対応アレイ型光電変換デバイス技術の開発 (デクセリアルズ)

研究開発項目 2 超高速・広帯域実装・リンク技術の研究開発

- 2-1) 200GHz 級のチップ間、パッケージ内/外のワイヤリング技術の開発 (ワカ製作所)
- 2-2 a) 低ノイズ計測のための熱・電磁ノイズ高耐性化技術の開発 (住友大阪セメント)
- 2-2 b) 高効率熱散逸構造の光電変換デバイス用パッケージの開発 (デクセリアルズ)
- 2-2 c) 低ノイズ計測のための熱・電磁ノイズ高耐性評価技術の開発 (早稲田大学)

(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	2	2
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	0	0
	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	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1：超高速・広帯域信号計測技術の研究開発

1-1 a) 200GHz 級 EO 変換デバイス技術の開発

200 GHz 級 EO 変換デバイス技術の開発に向け、薄膜 LN 変調器における電極設計のシミュレーション検討を実施した。広帯域特性と光導波路との速度整合に優れる進行波電極と容量装荷型電極を組み合わせた容量装荷進行波型電極を採用し、装荷電極構造による周波数依存性を評価した。また、EO 変換周波数特性の平坦化を目的とした EO イコライザー機能を備える薄膜 LN 変調素子の設計にも着手した。

1-1 b) 200GHz 級 OE 変換デバイス技術の開発

次年度に試作予定の OE 変換デバイスに搭載するフォトダイオードについて、周波数帯域 $f_{3dB} \geq 125 \text{ GHz}$ および受光感度 $\geq 0.1 \text{ A/W}$ という概略目標を実現することを目的として、UTC-PD (Uni-Traveling Carrier Photodiode) 構造を用いた基本デバイス層構成の設計方針ならびに解析手法を整理した。

具体的には、周波数帯域と受光感度の両立を念頭に置き、InP 基板上に形成される吸収層、電界緩和層、およびコレクタ層について、層厚み、キャリア濃度などの概略仕様を設定した。これらの構造パラメータに対し、デバイスシミュレータを用いてデバイス断面における電界分布解析を行い、その結果に基づき、I-V 特性および周波数帯域の見積りを行うための解析環境を整備した。さらに、上記デバイス構造から導出される CR 時定数およびキャリア輸送時間に加え、コープレナー電極を用いた実装構造が高周波特性に与える影響を考慮した周波数帯域モデルを導入した。これにより、デバイス単体特性と実装効果を含めた帯域評価が可能となり、次年度試作デバイスに向けた設計指針の明確化を図った。

1-1 c) 200GHz 級光・電気信号の帯域分割精密測定および計測技術の開発

本研究の初年度では、110 GHz 超の広帯域における光デバイスの高精度評価基盤の確立に向けて、系構成要件の定量化、測定・校正手法の高度化、ならびに帯域分割測定に関する設計仕様の策定および課題抽出を実施した。LN 強度変調器については、バイアス制御および光入力電力の最適化により、消光比 20 dB 以上を維持する安定動作条件と非線形歪みの抑制条件を明確化した。さらに、RF 掃引に対応した光サイドバンド評価手法を構築し、周波数依存の補正係数を導入することで、系固有の損失や偏差に起因する測定誤差を $\pm 1 \text{ dB}$ 以内に低減した。これらを統合した校正枠組みにより、110 GHz 帯までの広帯域において総合測定誤差 $\pm 1.5 \text{ dB}$ 以内の精度を達成した。

1-2) マルチコアファイバ対応アレイ型光電変換デバイス技術の開発

次年度に試作予定の4アレイ型OE変換デバイスに搭載する4chフォトダイオードについて、周波数帯域 $f_{3dB} \geq 70\text{GHz}$ および受光感度 $\geq 0.1\text{A/W}$ という概略目標を実現することを目的として、PIN型フォトダイオード構造を用いた基本デバイス層構成の設計方針ならびに解析手法を整理した。さらに、4chフォトダイオードアレイと4コア・マルチコアファイバとの低背実装を実現するための光学結合手段として、先端を斜め研磨したマルチコアファイバを用いた光学結合構造を新たに考案した。本方式では、ファイバ先端形状により反射抑制および光入射角制御を同時に実現することを狙いとしている。本実施例では、当該光学結合方式の実現可能性を確認するため、マルチコアファイバ先端の研磨角度、加工精度およびコア位置ずれが結合効率に与える影響についての検討を開始した。これにより、次年度のデバイス試作段階における光結合条件の指針を得ることを目的としている。

研究開発項目2：超高速・広帯域実装・リンク技術の研究開発

2-1) 200GHz級のチップ間、パッケージ内/外のワイヤリング技術の開発

本研究の初年度では、200GHz以上の高周波信号の伝搬が可能なケーブル、基板及びパッケージを接続する0.5mm同軸コネクタの設計、0.5mm同軸コネクタを用いたWR6導波管の変換アダプタ（周波数帯域: 110~170GHz）及びWR4導波管の変換アダプタ（周波数帯域: 170~250GHz）のそれぞれの基本構造の設計を実施し、電磁界シミュレーションで検証した。変換アダプタ内部の寸法パラメータの最適化を行い、反射特性は両者とも帯域内で-20dB以下を達成した。

2-2a) 低ノイズ計測のための熱・電磁ノイズ高耐性化技術の開発

薄膜LNに特有の熱によるバイアス点変動特性を明らかにするため、LN基板の結晶軸方向に依存する線膨張率など、熱応力の影響について調査を行った。親マッハツェンダーと子マッハツェンダーを有するネスト型でかつ折り返し構造の変調器を試作し、温度制御下で変調器のバイアス点を評価した結果、関連する技術課題の抽出を完了した。

2-2b) 高効率熱散逸構造の光電変換デバイス用パッケージの開発

高効率熱散逸構造を有する光電変換デバイス用パッケージの開発として、次年度に試作予定のRF出力に0.8mmコネクタを用いた光電変換デバイス用パッケージについて電磁界解析を実施した。本解析では、コネクタ中心導体部と、パッケージ内部に搭載するマイクロストリップ伝送路設計の石英基板との接続部を主対象とし、伝送特性の評価を行った。

その結果、概ね $f_{3dB} \geq 150\text{GHz}$ の良好な S_{21} 通過特性を確認することができた。本結果は、次年度に予定している試作に向けて、パッケージ構造および高周波接続設計の妥当性を示すものであり、開発上の大きな成果であると考えられる。

2-2c) 低ノイズ計測のための熱・電磁ノイズ高耐性評価技術の開発

200GHz級デバイス評価に向け、デュアル並列型MZMにおける電氣的クロストークの高精度測定手法を確立した。電極間結合をクロストーク係数 ξ として定式化し、一次サイドバンドから直接導出する理論を構築するとともに、バイアス掃引に基づく極値抽出法を導入することで、位相揺らぎや干渉条件の不確定性に起因する測定誤差を抑制したロバストな評価を実現した。実測により、クロストークは方向性結合器に類似した周波数依存性を有する電磁結合機構であることを解明した。また、本手法は従来のTwo-tone法と比較して高感度かつ低ノイズでの評価が可能であり、110~200GHz帯における高精度計測システム設計に資する基盤技術である。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1においては、来年度は、今年度の成果に基づいて、最終目標である 100 GHz 超級（145 GHz 以上）の光電変換デバイスの実現と高精度評価技術の確立に向けて、デバイス開発と測定技術の高度化を一体的に推進する。まず、EO 変換デバイスについては、周波数特性の平坦化技術を適用した薄膜 LN 変調器の設計・試作を行い、光帯域 145 GHz 以上の動作実証を目指すとともに、高周波測定技術の高度化に資するため、110 GHz 超級の試作素子を研究分担者へ提供する。

一方、OE 変換デバイスについては、周波数帯域 125 GHz 以上かつ感度 0.1 A/W 以上を満たすフォトダイオード素子およびモジュールの設計・試作を行い、高速光検出技術の確立を図る。さらに、マルチコアファイバ対応として、70 GHz 以上の帯域を有する 4 チャネルアレイ型フォトダイオードを開発し、チャンネル間クロストーク評価技術の確立および低損失光結合（目標 3 dB）の実証を行う。

測定技術に関しては、今年度に確立した評価系および校正手法を発展させ、110 GHz までの基準信号発生技術を確立するとともに、周波数帯域を分割した精密測定手法を構築する。具体的には、110 GHz 以下の帯域において誤差 2 dB 以下の高精度測定を実現し、分割帯域ごとに取得したデータを統合することで、200 GHz 級に対応可能な広帯域特性評価技術確立する。また、新規コネクタ規格に対応した 0.5 mm 同軸コネクタと導波管の変換デバイスを試作し、その高周波動作の実証を行う。

研究開発項目2においては、来年度は、今年度の成果に基づいて、100 GHz 超級光変調器および光検出器の実用化に向けた超高速・広帯域実装およびリンク技術の高度化を推進する。特に、100 GHz 以上の周波数帯に対応した新規コネクタ規格を適用した実装技術の確立と、光信号の発生・検出・測定における精度向上に向けたノイズ耐性および温度安定性の課題抽出・対策検討を進める。

まず、チップ間およびパッケージ内外の高周波ワイヤリング技術として、0.5 mm 同軸コネクタの設計および一次試作を完了し、WR6 導波管との変換アダプタを開発する。これにより、DC から 170 GHz までの広帯域における RF 特性評価を実施し、高周波実装基盤の確立を図る。

次に、低ノイズ計測の実現に向けて、薄膜 LN 変調器に特有のバイアス点変動特性を明確化し、温度変動や電磁ノイズの影響要因を抽出する。特に、高周波電極構造の違い（直線・曲げ）に着目した電磁界解析を通じて、ノイズ発生メカニズムの解明を進める。

さらに、高効率熱散逸構造を有する光電変換デバイス用パッケージの設計・試作を行い、周波数帯域 125 GHz 以上に対応した光受信モジュールの実装技術を確立する。パッケージサイズについては、20 mm × 20 mm × 10 mm 以下を目標とする。

加えて、光および電気スペクトルを用いたクロストークおよび非線形性の評価技術を開発し、30 GHz 以下の帯域で精密測定を実証するとともに、110 GHz まで適用可能であることを検証する。具体的には、-15 dB 程度のクロストークおよび -15 dB/c 程度の非線形成分の検出を目標とする。