

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00301  
研究開発課題名 テラヘルツ帯を用いた Beyond 5G 超高速大容量通信を実現する無線通信技術の研究開発  
副 題 研究開発項目 1 テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発  
テラヘルツ帯を用いたビーム制御通信システムの研究開発

(1) 研究開発の目的

室内空間において、ユーザーが必要とする大容量データを無線伝送する需要に向けて、従来のマイクロ波やミリ波では不可能な広い帯域を確保できる“テラヘルツ波”を用いたビーム制御通信システムの研究開発を実施する。テラヘルツ帯無線通信における電波の指向性を高めるため、化合物半導体を用いた高出力増幅器とアンテナを 3 次元異種集積によりアレイ化することで、300GHz 帯で動作する増幅器一体型アレイアンテナを開発し、ビーム制御を実現する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

富士通株式会社<代表研究者>  
学校法人五島育英会 東京都市大学

(4) 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 792 百万円 (令和 5 年度 192 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 テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発  
1-a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発 (富士通)  
1-b) 300GHz 帯アレイアンテナの研究開発 (東京都市大学)  
1-c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験 (富士通)

(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	4	1
	外国出願	3	2
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	27	13
	標準化提案・採択	2	1
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	6	4
	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 : テラヘルツ帯増幅器一体型アレイアンテナ技術の研究開発

#### 1-a) ビーム制御機能を有する増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールの研究開発

4×4 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを実現するため、1-b) の検討結果を元にモジュールの 3 次元化に向けたアンテナ選定を進めるとともに立体積層プロセスを確立し、4×4 アレイアンテナモジュール実現の目途を立てた。また、3 次元構造から成る 4×4 モジュールに増幅器を搭載する際の課題をシミュレーションから抽出し、対策案の検討を行った。以下に概要をまとめる。

##### (1) モジュールの 3 次元化に向けたアンテナ選定

4×4 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを実現するため、研究開発項目 1-b) の検討結果を元にモジュールの 3 次元化に向けたアンテナ選定を行い、小型化と加工性の観点で優れ、これまでに検討してきた導波管アンテナと同等の利得が期待される「八木-宇田型アンテナ」を選定した。

##### (2) 立体積層プロセスの検討

上記八木-宇田型アンテナを用いて 4×4 アレイの 3 次元モジュールを実現するため、1×4 モジュールを作製した後、それらを 4 レイヤー積層する立体積層構造/プロセスを確立し、0.7mm ピッチの 4×4 アレイアンテナ構造を実現した。

##### (3) 1×4 八木-宇田型アンテナモジュールの試作/評価

4×4 モジュールのベースとなる 1×4 八木-宇田型アンテナモジュールを試作/評価し、ビーム振り角 0、10° において、導波管アンテナと同等の利得 (>9dBi) が得られることを実証した。

##### (4) 4×4 八木-宇田型アンテナモジュールの設計/試作

上述の 1×4 八木-宇田型アンテナモジュールを 0.7mm ピッチで積層した 4×4 八木-宇田型アンテナモジュールを設計し、300 GHz にて各ポート間位相シフト 0° で最大アンテナ利得 16.4 dB、各ポート間位相シフト ±120° で最大ビーム振り角 ±26° が得られることの知見を得た。本結果を元にモジュール筐体の試作を行い、設計した 4×4 八木-宇田型アンテナモジュールが構造的に実現可能であることを実証した。

##### (5) 4×4 モジュールへの増幅器搭載に向けた MMIC および多層回路基板の設計/試作

研究開発項目 1-b) で設計した八木-宇田型アンテナをグレーティング・ローブを抑制可能な 0.7mm のアンテナピッチでモジュール適用するため、チップ面積:0.67×1.146mm の InP-HEMT 増幅器 (PA) モノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC) を設計/試作し、300GHz 帯での増幅性能を確認した。また、上述したアレイ構成において、内側 PA のバイアスライン引き回しを可能とする多層回路基板を検討し、設計/試作を完了させた。

##### (6) 4×4 モジュールへの増幅器搭載に向けた発振対策

PA 一体型 4×4 導波管アンテナモジュールの実現に向けて、回路・電磁界協調シミュレーションによりモジュール内での InP PA 2 チップの安定化検証を実施した結果、フリップチップ実装により安定化係数  $k$  値 < 1 となる 260, 290 GHz 付近でゲインが急上昇し、発振しているような傾向が見られ、さらに金属カバーを被せることにより  $k$  値 < 1 となる周波数帯が増え、より発振しているような傾向が見られることの知見を得た。また、これまでに検討してきた InP 基板厚薄化や SiC 接合はフリップチップ実装では PA の安定化に効果を示したが、金属カバーを被せることにより効果が無くなることの知見を得た。

そこで、InP 基板裏面に抵抗膜を設けた InP PA 2 チップの安定化検証を実施した結果、金属カバーを被せても非常に安定し、さらに 2 チップ間に遮蔽板を設けることによりより安定化係数を高めることが可能である知見を得た。また、モジュール側面にシート抵抗 300 Ω/□以上の抵抗膜を設けることにより、PA が安定化可能であることの知見を得た。

##### (7) 4×4 モジュールへの増幅器搭載に向けた放熱検討

PA 一体型 4×4 八木-宇田型アンテナモジュールにおける放熱検討のため、モジュール筐体にフィンを取り付け、強制空冷 (3 m/s) を行うシミュレーションを実施した。その結果、モジュール最低温度は 30.6°C と雰囲気 (30°C) と変わらない状態まで冷却できることの知見を得た。このとき、InP 基板裏面の最大温度は約 42°C で InP HEMT のジャンクション温度も 119°C に抑えることができる知見を得た。さらに、構造解析によりアンテナの最大変位量は 0.38 μm となり、アンテナピッチに対して十分小さいことからアンテナ特性には影響はないことの知見を得た。

#### 1-b) 300GHz 帯アレイアンテナの研究開発

令和 6 年度の最終目標である 4×4 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュール（ビームスキャン角度±30° において利得 15dBi）を実現するために、令和 5 年度は以下の(1)～(3)の項目を検討した。

##### (1) 300GHz 帯アレイアンテナの利得の測定

プローブステーションを用いて、令和 4 年度に考案した 300GHz 帯八木・宇田型アンテナの利得を測定した。アンテナを 3mm の高さにする支柱は金属だったため、多重反射により利得の周波数特性が波打った結果となったが、平均値としてはシミュレーション結果に近い値が得られた。

##### (2) 300GHz 帯アレイアンテナの利得の測定方法に関する検討

アンテナの利得測定はマイクロ波・ミリ波帯では通常は電波暗室で行われる。しかし、令和 4 年度に考案した 300GHz 帯八木・宇田型アンテナの測定は小形であるためにプローブステーションを用いる必要がある。プローブステーションの床面は金属となっているため、吸収体を敷くか、高さを確保するなどしないと高精度な利得測定は難しい。そのため、電磁界シミュレーションで吸収体の効果、ガラス支柱による影響の検討を行った。金属支柱では正確な利得測定は困難であるが、4mm の高さのガラス支柱を用い、アンテナ間隔を 2mm 程度離すことで利得測定が可能であるという知見が得られた。

##### (3) 4×4 八木・宇田型アレイアンテナのビームスキャン特性の電磁界シミュレーション

単体の利得 7.5dBi の八木・宇田型アンテナ（材料損失なし）を 0.7mm ピッチで並べた 4×4 アレイアンテナのシミュレーションを行った。ビーム角度 0° で 19.7dBi（材料損失なし）となり、単素子の約 16 倍(+12dB)の値が得られた。ビーム角度 30° でも 19.7dBi となり、利得の低下はおこらなかった。これは、単体の八木・宇田型アンテナの指向性によるもので、グレーティング・ローブ方向の素子指向性利得が低くなり、ビームスキャン時の利得低下が抑えられることがわかった。

#### 1-c) 増幅器一体型アレイアンテナ送信モジュールを用いた伝送実験

令和 6 年度の伝送実験に向け、令和 4 年度に構築したアレイアンテナモジュールの初期評価系を元に、実験系のレベルダイヤ検討と部材選定を進めた。

#### (8) 今後の研究開発計画

令和 5 年度に実施したモジュールの 3 次元化に向けたアンテナ選定および立体積層プロセスの検討結果に加え、4×4 モジュールに増幅器を搭載する際の発振対策や放熱検討を元に、化合物半導体を用いた高出力増幅器とアンテナを 3 次元で集積した 4×4 増幅器一体型アレイアンテナを実現し、令和 7 年 3 月の最終目標であるビームスキャン角度±30° における EIRP：40dBi を達成するとともに、開発モジュールを用いて伝送実験を行い、伝送速度：100Gbps、通信距離：3m を実証する。