

氏名	上原 一 浩
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成4年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	ミリ波帯イメージングの研究
指導教官	東北大学教授 水野 皓司
論文審査委員	東北大学教授 水野 皓司 東北大学教授 安達 三郎 東北大学教授 高木 相 東北大学助教授 澤谷 邦男

論 文 内 容 要 旨

本論文は、ミリ波帯イメージングシステムの開発と応用を目的とし、検出器アレイ（イメージングアレイ）及びミリ波光学系の設計と製作を行った。更にイメージングシステムの性能評価を行い、また実際にミリ波帯イメージングの応用として、プラズマ電子密度分布の計測を行い、本システムの有用性を示した。

第1章ではミリ波帯電磁波の特徴と応用、及びミリ波デバイスの開発の現状についてまとめ、またミリ波帯イメージングの開発の現状について述べ、これらより本研究の歴史的背景と意義並びに目的を明らかにし、また本研究の独創的な点について述べた。

本研究の特徴は、ミリ波帯電磁波の特徴を有効に生かしたものであり、また近年急速な発展を遂げている半導体プロセス技術の所産である微細加工技術や集積化技術を用い、更に最新の高性能な高周波デバイスを用いたものである。また本研究においては、電波技術と光技術を融合した新たな設計手法を用いてシステムの設計を行っている。

ミリ波帯イメージングの技術は近年その重要性を増し、大きな発展を遂げつつある。ハード面では近年半導体プロセス技術が急速に発展し、これによりサブマイクロオーダーの微細加工技術や集積化技術が実用段階に入っている。これらの技術を用いてモノリシック化した小型・軽量の高分解能センサの製作が可能となり、一方ミリ波帯の電磁波は、霧や雲に対し、可視あるいは赤外域に比べ著しく減衰が少なく、またマイクロ波微に比べ高分解能が得られる。これらの特徴を生かした、ラジオメータ、電波天文学、また大気汚染・水蒸気・気温高度分布や火山観測等の地球環境計測用

センシングシステム、あるいは衝突防止レーダや対地速度ドップラセンサ等の自動車安全走行用センシングシステムなどの新しいシステムが目目されている。また化石燃料に代替する新たなエネルギー派の実現を目指した核融合研究において、その臨界条件を克服する上でプラズマ電子密度の計測は必要不可欠であり、この計測はミリ波帯イメージングの技術を用いて効率よく行われる。本研究ではミリ波帯イメージングアレイ用検出器として二種類の検出器構造を提案し、それらの研究開発を行った。

第一番目の検出器は、アンテナ・検出素子一体型の検出器であり、アンテナとして誘電体レンズ上に構成したプリント型八木・宇田アンテナを用い、その給電点には検出素子としてショットキバリアダイオード (SBD) がハイブリッドに集積される (図1)。本検出器の特徴は、八木・宇田アンテナを用いることによりアンテナの低インピーダンス化を実現し、またそれを誘電体上に設けているため、更に小さなインピーダンスとなり、整合回路を設けずとも SBD・SIS 等のインピーダンスの小さな検出素子との整合がよい。更にアンテナ寸法を変えることによりインピーダンス整合を最適化することができ、また同時に指向性パターンを改善し主鏡に対する開口効率を高くすることができる。この方法により種々の検出素子を用いることができ、また光学系の設計における自由度が大きい。

アンテナの寸法は半波長程度であり、またアンテナ・検出素子間の整合回路が不要であるため検出器が小型になり、狭い間隔での配列が可能となり高分解能システムの実現が可能となる。誘電体レンズ上にアンテナを設けることにより、アンテナは波動インピーダンスの小さな誘電体側の感度が高くなり、一方十分な機械的安定度も得られる。検出器アレイの製作はフォトリソグラフィの技術を用いて容易に行われ、モノリシック化にも適する。

第2章ではこの八木・宇田アンテナ型検出器、及びこれを用いたビデオ検出システムの設計及び測定について述べた。誘電体上八木・宇田アンテナ及びビームリード型 SBD の解析と測定を行い、検出器及びシステムの設計に適用した。これにより小型の検出器が実現可能であることを示し、また実際に製作した 50GHz 帯ビデオ検出システムを用いて光学系の回析限界の空間分解能が得られることを明らかにした。

また第3章では、この八木・宇田アンテナ型検出器を用いたヘテロダイン検出システムの設計及び測定について述べた。システムを光学系、アンテナ系、ダイオード、及び IF 系の各部分に分け、それぞれについて変換損失及び雑音温度の定量的な解析を行い、個々の検出器及びシステムの最適設計を行った。また hot/cold load 法により、ミキサー変換損失 12.5dB、ミキサー雑音温度 3600 K、及びシステム雑音温度 9200 K を測定した。この場合にも本構造は、アンテナの寸法を変え、ヘテロダイン特性の改善を行うことができることを示した。

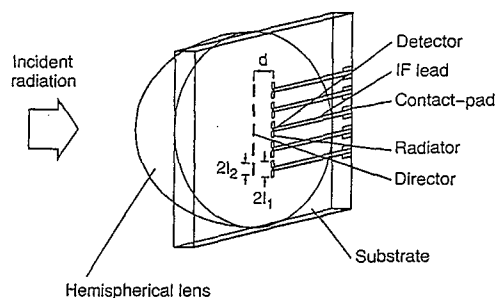


図1：八木・宇田アンテナ型イメージングアレイ

第二番目の検出器は、二次元配列を目指した多層マイクロストリップ回路型の検出器である。アンテナとして誘導体レンズで覆ったマイクロストリップアンテナを用い、検出素子、リード線等は背向する第二番目のマイクロストリップ基板上に構成している(図2)。このためアンテナアレイと信号系は完全に独立し、それぞれの設計の自由度が大きい。この基板にはインピーダンス整合回路や高周波増幅回路、あるいは論理回路等の付加回路を構成することも可能であり、またMMICとの整合性もよい。本構造ではインピーダンス整合回路を自由に構成できるため、任意の検出素子に対応でき、また検出素子を冷却することも可能である。

検出器の二次元配列に関しては、アンテナ寸法は半波長程度であり、かつアンテナと同一の平面上にはリード線等の障害物が存在しないため、狭い間隔での二次元配列が可能である。検出器の指向性は基板方向が null で、かつサイドローブ及びバックローブが全く無い軸対称のパターンとなり、高い開口効率が得られる。

第4章ではこの多層マイクロストリップ回路型検出器アレイの設計及び測定について述べた。誘電体で覆ったマイクロストリップアンテナの解析と測定を行い、検出器アレイの設計に適用した。アレイの二次元化に関しては、これまで開発の行われていなかった非常に狭い検出器間隔の二次元アレイを実現した。

第5章では本ミリ波帯イメージングの応用例であるプラズマ計測について、ミリ波位相イメージング法干渉計の設計、及び筑波大学 GAMMA10 タンデムミラーにおけるプラズマ電子密度分布の時間変化の測定について述べた。

ミリ波位相イメージング法干渉計の光学系の設計に関しては、波動論と幾何光学論とを融合した設計手法を用い、ビーム伝送公式と光線追跡法により、損失及び収差の少ない光学系を実現した。一方検出器アレイに関しては、プラズマ計測用にトラップ装荷八木・宇田アンテナ型イメージングアレイを提案し、解析と測定によりその開発を行った。これらにより70GHz帯10チャンネル位相イメージング法干渉計を実現し、

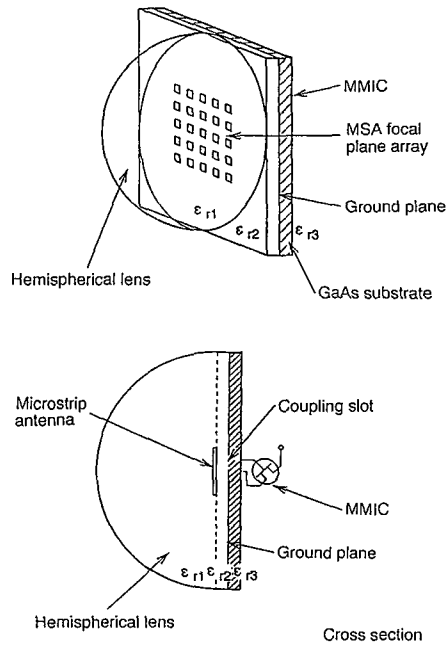


図2：マイクロストリップアンテナ型イメージングアレイ

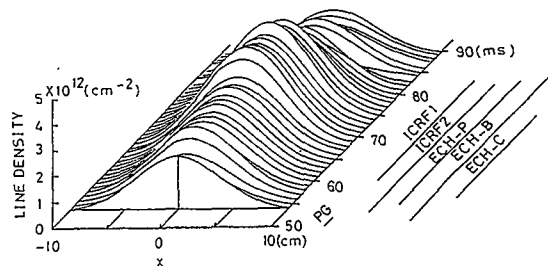


図3：プラズマ径方向線密度分布の時間変化

誘電体移相物体の位相像を測定することにより，本干渉計の良好な結像性能を示し，また実際にプラズマ電子密度を測定した場合，位相イメージ法干渉計の各チャンネルが，単一可動型干渉計を用いた場合と非常によく一致した結果を与え，これらにより本システムの有用性を示した。実際に筑波大学 GAMMA10 プラグバリア部に本システムを装着し，タンデムミラー装置においては世界で初めて，プラズマ電子密度分布の時間変化をリアルタイムで計測することに成功した（図3）。

第6章は結論であり，各章ごとに得られた成果と今後の課題についてまとめた。

審 査 結 果 の 要 旨

電磁波の各スペクトルは、それぞれ固有の特性を持っている。光とマイクロ波の中間領域に存在するミリ波は、イメージングの立場からみると、霧、雲に邪魔されず、またマイクロ波に比べて分解能が高くとれる等の特長を有しており、この領域におけるイメージング技術の開発が各種計測の分野より待たれていた。著者は、イメージングアレイ特にそのアンテナ系にいくつかの新たな提案を含む考察を加え、ミリ波帯イメージング装置を開発した。更にそれを実際にプラズマ計測に応用し、有用性を実証した。本論文はそれらの成果取りまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論で、本研究の背景と意義とを述べている。

第2章では、イメージングアレイ用のアンテナとして誘電体（レンズ）中に埋め込まれた導波器をもつ八木・宇田アンテナを提案し、その特性について理論、実験の両面より論じている。導波器の構造によりインピーダンス、アンテナパターンともに調整でき、検出素子のインピーダンスとのマッチングおよび主鏡との光学的な整合を取り得ることを示しているが、これは大きな成果である。

第3章では、前章でその設計法を論じた八木・宇田アンテナのヘテロダイン検出特性を測定し、50GHz帯においてミキサ温度3600Kを得ている。

第4章では、2次元イメージングアレイの開発を目的として、マイクロストリップアンテナ型のアレイを提案し、その解析および50GHz帯用に試作した 3×3 アレイの特性について記述している。著者はまず理論解析により、基板と同じ誘電率をもつ誘電体レンズで覆ったマイクロストリップアンテナの指向性パターンが軸対称で、かつ基板に沿う方向に指向性を持たないことを示し、次いで実験によりそれらを確認している。また受信信号の処理系としてマイクロストリップ基板を多層構造にしたものを提案している。これらは、ミリ波帯2次元イメージングアレイの実用的な構造を提示したもので、重要な成果である。

第5章では、第2章で開発した八木・宇田アンテナイメージングアレイを筑波大学の核融合研究用のプラズマ装置に適用して、1ショットの放電でプラズマ密度分布の計測に成功し、ミリ波帯イメージングアレイの有用性を示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ミリ波帯におけるイメージング技術を開発することを目的に、レンズ結合型イメージングアレイについて研究を行い、いくつかの重要な成果を得たもので、電子工学ならびに計測工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。