

博士学位論文審査報告書

申請者氏名 伊丹 豪
学位の種類 博士（工学）
論文題目 Study on electromagnetic-wave control in conductive periodic structures and its applications for devices
学籍番号 1868001
学歴 平成21年4月 京都大学工学部電気電子工学科 入学
平成25年3月 同上 卒業
平成25年4月 京都大学大学院工学研究科
電子工学専攻修士課程 入学
平成27年3月 同上 修了
平成30年4月 滋賀県立大学大学院工学研究科
先端工学専攻博士後期課程 入学
令和 2年3月 同上 修了見込

論文審査委員 (主査) 滋賀県立大学工学研究科 教授 酒井 道
滋賀県立大学工学研究科 教授 奥 健夫
滋賀県立大学工学研究科 教授 岸根 桂路



論文の内容の要旨

(論文審査の結果の要旨は概ね A4 版とし、2000 字程度)

本論文は、電磁界理論とそれに関連する応用概念であるメタマテリアル設計に基づいた、次世代の通信・デバイスに資する学術ならびに応用技術に関する研究（以下、本研究と呼称する）をとりまとめたものである。全体の概要として、2次元導体周期構造の境界的作用と媒質的作用の制御条件に関する理論的考察を行い、そこから得られた表面波伝搬現象(SSPP)、周波数選択板(FSS)機能、人工媒質の知見をもとに、ミリ波・テラヘルツ波応用と無線通信環境制御に資する電磁波媒質ならびに電磁波制御デバイスの実現可能性について論じている。

まず、第 1 章で、研究の背景について説明している。広義のメタマテリアルである擬似表面プラズモン生成構造や周波数選択板は、その電磁的性質を人工的な構造パラメータで制御できる特徴を持つが、その制御性は学術的な価値が有り応用可能性は示されつつも、実用技術として具体化されていないのが現状である。そこで、本研究で論ずる、これらの周期構造の制御性に関する理論的考察と応用技術としての具体的な検証内容の背景と概要について記述している。

次に、第 2 章において、周期構造の境界的作用と媒質的作用の制御条件に関する理論モデルとして、SSPP や FSS において典型的に用いられている開口アレイ構造(MHA)とその逆構造(MPA)を用いて、構造の厚みとそれに対応する現象変化の関係性について論じている。境界面として作用する場合、その電磁的特性が電界と磁界の双対性よりバビネの定理に従うことが知られている。一方で、媒質としてみた場合、構造表面上に SSPP が生成するため、構造の厚さ変化により境界的作用から媒質的作用へと変化するとき、バビネの定理が崩れる状況が発生すると予想した。まず MHA と MPA における SSPP 生成理論について説明しつつバビネの定理の破れについて理論的に議論し、続いて構造の厚みを変化させたときの両構造のもつ周波数特性の変化について数値解析と実験によって確認した結果を示した。最終的に、バビネの定理が破れる条件が、構造の厚みとして $1/10$ 波長程度であることを実証している。

第 3 章では、ミリ波・テラヘルツ波デバイスへの応用技術の一つとして、高周波伝送路からの染み出し抑制を目的とした SSPP 伝送路設計時の表皮深さの理論的な予測モデルとその実験的な検証について論じている。反射体の設置とその可動性を用いた独自の診断系を構築して実験を行いながら、SSPP における表皮深さの理論値の導出も行った。その結果、理論予測値と実験値の良好な一致が得られたことを説明している。

第 4 章では、ミリ波・テラヘルツ波デバイスとしての応用技術のもう一つの内容として、上記周波数帯の SSPP 生成構造の動的制御による簡易生体診断手法を提案し、その実現可能性について実験的に検証した。具体的には、まず、近傍電界による SSPP の動的制御を用いた診断メカニズムの妥当性を検証したのちに、本診断手法を用いた生体を含む種々のサンプルの 2 次元イメージング実験を行った。その結果、近傍電界による SSPP の動的制御によって局所的な誘電応答が得られることを確認し、導体、誘電体、生体擬似材料、生体（がん細胞を含むラットの肺）の誘電率分布が実験的に得られ、生体診断手法としての実現可能性が示された。

さらに、以降の章では、無線通信環境に資する電磁界制御技術として、広帯域・小型到来波方向推定装置(DOA 装置)と簡易設計可能な周波数適応空間フィルタ(適応 FSS)を設計および作製した結果について報告している。

第5章では、DOA装置について、周期構造媒質を用いて無線通信の主要周波数帯である2・6 GHz帯を対象としたサブ波長散乱パターン形成空間を設計し、散乱パターンを用いて、到来波の周波数と到来角情報の抽出可能性について数値解析と実験によって検証した。その結果、上記空間内で定在波が生じることが確認され、散乱パターンは周波数と到来角に応じて変化し、その挙動は数値解析と実験で同様の傾向を示すことを確認した。

第6章では、適応FSSについて、外部電源を用いない構造設計により、任意の動作周波数に適応可能な3層型のFSSを設計および作製した。層同士の重ね合わせ状態を特定の方向にずらすことで、層間に形成される電気容量を変化させて動作周波数帯を変化させることができることを提案した。そして、本原理の妥当性を、等価回路モデル、数値解析、そして実験によって検証した。その結果、等価回路モデルの妥当性を確認し、解析結果と実験結果が良好な一致を示すことがわかった。

最後に、第7章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、本研究が契機となって広がる学術領域と期待される工学的進展について述べている。

論文の審査結果の要旨

(論文の審査結果の要旨は A4 版とし、1000 字程度)

本論文は、広義のメタマテリアルの一つである 2 次元導体周期構造の境界的作用と媒質的作用を活用した新規デバイス応用の研究に関する論文である。

以下に、本論文で示された主な成果をまとめる。

- (1) 表面波伝搬現象や周波数選択板構造で扱われる開口アレイ構造とその相補的逆構造において、相補的逆構造が境界的作用から媒質的作用に遷移するという理論モデルを提案し、 $1/10$ 波長程度の厚みで上記の遷移が生じて「バビネの原理が破れる」新規物理現象の実験的観測に成功した。
- (2) ミリ波・テラヘルツ波帯伝送路からの染み出し抑制を目的とした表面波伝搬伝送路において、表皮深さの予測モデルの導出と実験検証を行い、予測値と実験値がほぼ一致し、表皮深さの制御法が確立できた。さらに、同周波数帯の表面波の近傍電界成分の動的制御に着目して、誘電率分布測定法を提案し、その応用例として簡便で低コストの生体組織診断法を示した。
- (3) サブ波長程度の 2 次元導体周期構造近傍に生じる散乱パターンに着目した広帯域対応の到来波方向推定手法を提案し、マイクロ波帯でその実現可能性を数値解析と実験により実証した。検出した散乱パターンが、周波数および到来角に応じて入射波の波数ベクトルで解釈できることを示した。
- (4) 層間容量結合の回路表現に着目し、外部電源不要の層状 2 次元構造により、動作周波数が可変の適応型 3 層周波数空間フィルタの設計法を提示し、設計妥当性と実現可能性について、等価回路モデル、数値解析、実験により検証した。重ね合わせ状態を特定方向にずらすことで、最低周波数を基準として約 1.7 倍の範囲で動作周波数が制御可能であることを示した。

本論文に示された成果は、工学的観点で種々の産業応用が見込まれる。デバイス設計の観点では、次世代超高速回路設計における帯域設計限界を緩和し、新規周波数帯の開拓に資する設計手法として有効であり、また無線通信分野では、多様かつ複雑化する電波環境下における空間リソース活用の向上および周波数リソースの拡大をもたらし、さらに医療分野への応用可能性も示されている。学術的観点でも、電磁界理論の常識にとらわれず、これまで定説であったアンテナ・空間フィルタの設計上の制限を取り除いた。そして、以上の研究業績は、工学研究科における課程修了による博士の学位授与に関する内規の運用方針に定める基準に関する要件を満たしている。

以上に基づいて、本論文は博士（工学）の学位論文として価値があるものと認める。また、令和元年 12 月 23 日の公聴会に引き続き実施した最終試験の結果、合格と判定した。