

氏 名	Liu Dejun
学 位 の 種 類	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 9266 号
学位授与年月日	令和元年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	Investigation of periodic metal structures for terahertz miniature waveguides and resonators (テラヘルツ小型導波路および共振器のための周期的金属構造の研究)
主 査	筑波大学 教授 理学博士 服部 利明
副 査	筑波大学 教授 博士(工学) 長谷 宗明
副 査	筑波大学 教授 工学博士 伊藤 雅英
副 査	筑波大学 助教 Ph.D 游 博文
副 査	物質・材料研究機構 グループリーダー 博士(工学) 宮崎 英樹

## 論 文 の 要 旨

本論文は、テラヘルツ波のための金属製小型導波路および共振器についての論文であり、1章から7章までからなる。著者の Liu Dejun 氏は、テラヘルツ波を用いた小型のセンシング装置の開発を目的として、おもに金属からなる微細構造(フォトニック構造)を用いて導波路やその他の構造を作成し、テラヘルツ分光測定によってその特性を明らかにするとともに、いくつかの計算手法を用いたシミュレーションによって、そのフォトニックバンド構造、電場分布などを明らかにした。著者が主に対象とした構造は、金属ロッド配列(MRA)および金属メッシュ(MWWM)である。

1章は全体の導入であり、テラヘルツ波、テラヘルツ導波路などの重要な概念などに関する説明がなされる。2章は、本論文で用いられているテラヘルツ時間領域分光法を用いた分光測定装置とその原理について、3D プリンタとスパッタリング装置を用いた微細構造の作成手法について、そして計算手法である有限積分法(FIT)、有限要素法(FEM)、有限差分法(FDTD)とそれらにおける境界条件について記されている。

3章から6章が本論文の主要な部分であり、MRAとMWWMのテラヘルツ波に対する特性が詳細にわたって明らかにされている。

3章では、MRAのテラヘルツ導波路としての特性を明らかにしている。金属基板上のMRAが導波路として機能することを計算と実験の両面から明らかにし、さらに、フォトニックバンド構造や透過スペクトルより、これが誘電体周期構造と同様にフォトニックギャップを有することを示した。しかし、誘電体構造の場合と異なり、MRAでは、フォトニックバンドのうちの最低エネルギーのバンド(第1バンド)が漏れモードであり、

短距離で大きく減衰してしまうのに対し、第 2 バンドでは電場がより MRA 中に局在し、伝搬による減衰が非常に小さいことを見出した。その物理的原因について、電場の局在の観点から議論している。4章では、MRA の特性や電場分布におけるロッド間距離依存性などを調べており、それらは3章の結果に対する示唆を与えている。5章では、上記の MRA 構造に誘電体薄膜を組み合わせたハイブリッド構造について調べている。薄膜の厚さ依存性や、電場分布から、薄膜部分に存在する対象物のセンシングに対する特性を明らかにした。特に、センシングの対象物が存在する場所に電場がより強く局在するようなパラメータを選ぶことにより、センシングにおける感度が向上することを示した。この成果は、単に MRA のテラヘルツ特性を明らかにし理解することを超えて、センシングへの利用に向けて大きく踏み出すものである。

6 章は、MWWM に関する研究成果について記している。著者は、丁寧な実験から、MWWM のテラヘルツ透過スペクトルに狭帯域の落ち込みが存在することを初めて見出した。狭帯域のスペクトル構造は、センシングへの応用に有用であるため、これは重要な発見である。これまでにこれが見いだされなかった原因として、著者は、このスペクトル構造の観測のためには、波数ベクトルの十分にそろった大口径コリメートビームを入射する必要があることを示している。著者は、シミュレーションや理論的な考察によってこの落ち込みの物理的背景について議論しており、ウッド・アノマリーの関与も否定はできないが、このスペクトル構造はおもにファノ共鳴と考えることができることを示している。著者は MWWM が 2 層の金属構造とみなせることを示し、シミュレーションにおいてそのうちの 1 層だけからも、観測されたテラヘルツ特性をほぼ再現できることを示した。その上で、直線状の金属線からはこのスペクトル構造は観測されず、MWWM を構成する金属線の曲がりの大きさとともに、スペクトル上の落ち込み構造が深くまた幅広くなることを示した。

最後の7章は全体の結論であり、本論文で扱われた 2 種類の構造である MRA と MWWM のテラヘルツ波に対する特性の特徴をまとめている。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

Liu Dejun 氏は、微細構造の設計、3D プリンタとスパッタリングを用いた作成、シミュレーションによるその特性や電場分布などの解明、テラヘルツ分光測定による分光特性の評価、さらに得られた特性に関する理論的な考察という一連の作業を一人で行い、その結果を論文にまとめている。フォトニック構造の分野では、一人の研究者あるいは一つの研究グループでこれらすべてを行うことで、見通しの良い研究が遂行できるので、氏は、この分野の第一線で活躍できる研究者として十分な能力を持っていることを、本論文の内容は示している。

特に本論文で扱われている MRA, MWWM のどちらも、これまであまり研究がなされていない構造であり、基本的な特性の理解から応用に関わる特性にいたるまで、すべてを解明する必要があったが、実際に一人でそれを行ったことは、大変に評価される。その結果、本論文では、シミュレーション結果と実験結果を合わせて大量のデータを掲載し、それに関する記述を含めて、大部なものとなったが、すべて博士後期課程の 3 年間の成果であり、短期間でこれだけの成果を上げたことは、大いに評価される。

MRA における電場分布の影響、MWWM におけるファノ共鳴に関する議論など、それぞれの研究対象の特徴に応じた深い議論がなされており、評価される。

本論文で得られた成果のうち、特に MWWM における狭帯域のスペクトル構造は、これまで報告がないものであり、今後広く注目を集めることが期待されるような重要な研究成果であり、とても評価される。

〔最終試験結果〕

令和元年 8 月 1 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者の論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査並びに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。