

# 学 位 審 査 報 告 書

|                                              |                                       |
|----------------------------------------------|---------------------------------------|
| ( ふ り が な )<br>氏 名                           | みのわ ようすけ<br>蓑輪 陽介                     |
| 学位 (専攻分野)                                    | 博 士 ( 理 学 )                           |
| 学 位 記 番 号                                    | 理 博 第 号                               |
| 学位授与の日付                                      | 平成 年 月 日                              |
| 学位授与の要件                                      | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当               |
| 研 究 科 ・ 専 攻                                  | 理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻                    |
| (学位論文題目)<br><br>テラヘルツ周波数領域における電磁メタマテリアルの光学特性 |                                       |
| 論 文 調 査 委 員                                  | (主査) 中 暢子 准教授<br>松田 祐司 教授<br>高橋 義朗 教授 |

理 学 研 究 科

( 続紙 1 )

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                            |    |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----|------|
| 京都大学                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 博士（理学）                     | 氏名 | 蓑輪陽介 |
| 論文題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | テラヘルツ周波数における電磁メタマテリアルの光学特性 |    |      |
| (論文内容の要旨)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                            |    |      |
| <p>本論文は、テラヘルツ周波数領域における電磁メタマテリアルの光学特性の実験的・理論的な詳細な研究を報告したものである。電磁メタマテリアルは金属や誘電体からなる人工的な構造を1、2あるいは3次元的に（周期的に）配置することで作られる。その特徴的な長さスケールよりも長波長の電磁波に対しては、この構造全体を一樣な物質と看做することができる。自然界では得られないような光学定数を設計することが可能であり、負の屈折や完全レンズ、透明マントなどの興味深い物理現象が盛んに研究されている。</p> <p>本研究では、電磁メタマテリアルの光学特性を評価するための実験的・解析的手法をテラヘルツ周波数領域において確立し、さらにその手法を通じて実際に作製したいいくつかの電磁メタマテリアルの興味深い光学特性を探ることを目的とした。テラヘルツ周波数領域では電磁波の波長は比較的長いことから（1THzにおいて300<math>\mu</math>m）、精度良く系統的に様々な電磁メタマテリアル試料を作成することができる。本研究では実際に電磁メタマテリアルを作製し、テラヘルツ時間領域分光法によって強度スペクトルだけでなく位相スペクトルも得ることによって、詳細に光学特性を論じた。</p> <p>まず、透過型および反射型テラヘルツ時間領域分光法を用いて金属ワイヤグリッド構造の光学特性を評価した。ワイヤグリッド構造に限らず金属の薄膜や板に周期的に穴やスリットが空いている構造に対して、幾何光学近似で予想されるより多くのエネルギー透過率が得られる現象、異常透過現象が盛んに研究されている。本研究で用いた4種類の金属ワイヤグリッド試料についてもテラヘルツ光電場がワイヤに平行な場合に異常透過現象が観測された。この試料に対して、透過型および反射型テラヘルツ時間領域分光法の実験結果から有効光学定数を導出した。得られた誘電率にはプラズマ周波数が0.6THzであるような金属的なドルーデ型の誘電分散が見られる。理論モデルとの比較から、このような誘電率はワイヤ間の相互インダクタンスによって実効的にプラズマ振動が減速した結果であると解釈できることがわかった。テラヘルツ光電場がワイヤに垂直な場合についても実験・解析を行い、この構造が誘電体のように振舞うことがわかった。すなわち、テラヘルツ光の偏光方向によって、金属的に振舞う場合と誘電体的に振舞う場合がある。またこの試料において透磁率が1からずれることも実験的に確認した。これは有限サイズの導体を持つ磁氣的な応答を考えることで説明できる。</p> <p>次に、テラヘルツ時間領域全反射減衰分光法を用いて、半導体基板上に形成された2次元金属構造の導波路としての特性を調べ、この構造が薄膜メタマテリアル導波路として振舞うことを明らかにした。導波路モードを調べるための実験的・解析的手法を確立し、実際にその手法によって導波路モードの存在を明らかにした。通常的全反射減衰分光法では、減衰全反射率に試料からの反射光とプリズム面からの反射光の干渉効果が含まれてしまい、実際の導波路モードの励起周波数と実験結果から推定される励起周波数との間にずれが生じてしまう。しかし、本研究で提案する新しい手法に</p> |                            |    |      |

より、試料からの反射のみを取り出すことができる。この手法で試料からのエヴァネッセント光反射率を実験的に決定した。その結果、TM 偏光（エヴァネッセント光の磁場が試料面に平行な配置）と TE 偏光（磁場が試料面に平行な配置）の両方の場合に対して、エヴァネッセント光の反射による増強が確認された。増強がおきる周波数は、試料を一様な薄膜とみなした場合に計算から予想される導波路モードの励起周波数によく一致していることから、この電磁メタマテリアルを導波路として扱うことが可能であることを結論した。

(論文審査の結果の要旨)

電磁メタマテリアルは比較的新しい物理概念であり、その電磁気学特性や光学特性を解析するための汎用的な手法・指標はいまだに確立されていない。本論文では、実験的に電磁メタマテリアルの光学特性を調べるための新たな手法を2つ提案している。それぞれ伝搬光に対する光学特性、エヴァネッセント光に対する光学特性を定量的に測定できる手法である。これらの手法を用いて金属ワイヤグリッド構造における異常透過現象の起源を定性的に理解することに成功している。また、半導体上の金属2次元構造が薄膜メタマテリアル導波路として振舞うことを初めて明らかにしている。さらにこのような薄膜メタマテリアル導波路では、強く光を閉じ込める電磁場モードが実現していることを理論計算により示した。

まず、金属ワイヤグリッド構造において異常透過現象が起きることを透過型テラヘルツ時間領域分光法によって見出している。また、透過型テラヘルツ時間領域分光法と反射型テラヘルツ時間領域分光法を組み合わせることで試料の持つ有効誘電率および有効透磁率を抽出する手法を確立した。この手法は、先行研究によって報告されている手法に新たな解析手法を加え修正したものである。この手法を用いることにより、金属ワイヤグリッド構造の光学的特性すなわち偏光子としての振る舞いおよび異常透過を定性的に説明することに成功している。テラヘルツ電場がワイヤに対して平行な場合には、ワイヤ間の相互インダクタンスの効果によりプラズマ周波数が3桁減少した金属のように振舞っており、垂直の場合には誘電体薄膜のように振舞っている。これらの結果から、異常透過現象はこのプラズマ端での透過の立ち上がり起因することを結論づけている。新たな異常透過現象のメカニズムを提案し、それを支持する実験結果と理論解析を提示した点は高く評価できる。

これまでの電磁メタマテリアル研究は単純な反射や透過に関するものが多かった。特に半導体上の金属2次元構造に対するテラヘルツ周波数領域での電磁メタマテリアル研究は、その全てが透過や反射における光学特性に限られていた。本論文の後半部では、試料のエヴァネッセント光に対する光学特性に着目し、それを実験的に定量的に測定するための手法を新しく提案している。この新たな手法による実験結果と、試料を一樣な薄膜と看做した時の理論計算を比較することで、この試料が一樣な薄膜メタマテリアル導波路として振舞うことを明らかにした。さらに理論計算によって、この薄膜メタマテリアル導波路において、光を波長以下の小さな領域に閉じ込める導波路モードが存在することを明確に示した。このような金属2次元構造を一樣な薄膜メタマテリアル導波路と扱うという視点は新しく、その新規性が高く評価できる。また実験と理論を比較することで、そのメタマテリアル概念の有効性を示したことも非常に意義があると考えられる。

以上のように、本論文はテラヘルツ周波数において電磁メタマテリアルを研究するための手法を新たに確立するとともに、電磁メタマテリアルの興味深い光学特性の起源や概念の有効性にまで踏み込んだ重要な研究である。また、論文で提案された手法

は電磁メタマテリアルの研究だけでなくテラヘルツ周波数における光物性研究全てに適用可能なものであり、大きな意義がある。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 1 月 15 日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 2010 年 12 月 31 日以降