

## 審査の結果の要旨

氏名 郑 渚

周波数が 0.1THz から 10THz ほどの周波数領域の電磁波は、テラヘルツ波と呼ばれる。この帯域の電磁波は半導体や金属中の自由キャリア運動、分子の回転運動や振動、あるいは固体の磁氣的励起などといった物質中の様々な励起と強く結合する。このため、テラヘルツ波による分光計測法の開拓は、基礎応用両面にとって重要な課題となっている。テラヘルツ波は電波と光の中間の周波数領域であり、その発生・検出が難しいとされていたが、近年のパルスレーザー技術の進歩により、パルス光と物質の非線形光学効果や超高速キャリア駆動などを利用した発生検出技術が開拓され、テラヘルツ波の応用分野が急速に拡大している。特に極短パルス光によって発生されるテラヘルツ波は、シングルサイクルに近く、非常に広帯域であり、テラヘルツ領域の分光情報を一気に取得できるという特長がある。この特長を活かすために、計測に用いる光学系は、反射型の光学素子を用いて空間伝播を利用することが多く、測定評価システムは大型でフレキシビリティのないものになってしまうという欠点があった。

本研究では、この困難を克服する一つの方策として、金属ワイヤによるテラヘルツ波の導波に注目した。金属ワイヤは、金属中のプラズマ振動による Sommerfeld 波と呼ばれる電磁波を、広帯域かつ低損失で導波することが知られている。Sommerfeld 波はワイヤを中心として放射状の電場振動を持つため、通常の直線偏光や円偏光の空間伝播ビームとの結合効率はきわめて低いことが課題となっていた。そこで、Sommerfeld 波と高い結合効率が期待される、Radial beam の発生法を新たに考案し、それを高効率で金属ワイヤに結合する手法の開発を目的とした。Radial beam はこれまで、可視光領域で研究が進められ、波長以下の微小集光や、集光点での縦電場発生などの観点で興味がもたれていた。テラヘルツ波においても、波長以下の集光や縦電場発生は様々な応用が期待される。

本論文は英文によって執筆され、以下の 7 章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第 1 章では、本研究の背景となる、テラヘルツ電磁波およびベクトルビームについて基礎事項をまとめ、テラヘルツ領域におけるベクトルビーム発生に関するこれまでの研究について概説し、本研究目的と本論文の構成について述べている。

第 2 章では本研究の基礎となる、パルス光源を用いたテラヘルツ波の発生法と検出法について述べ、時間領域のテラヘルツ分光法について解説している。

第 3 章では、本研究で用いた実験システムについて述べている。パルスレーザー光源の紹介、アンテナを用いたテラヘルツ波検出の特性評価、2次元の時間領域計測法について述べている。

第 4 章では、本研究で議論するベクトルビームの特性について、電場の空間分布、集光特性の理論を詳細に述べている。また本研究と関連の深い、可視光領域での先行研究について紹介している。

第 5 章では、広帯域のテラヘルツベクトルビームの発生と検出について述べている。

(111)面に切り出した閃亜鉛鋅型半導体結晶板に垂直にパルス光を入射する配置における2次の非線形光学効果の偏光特性について説明し、それを利用したテラヘルツ擬ベクトルビーム発生の新しい手法について述べている。第一は、(111)面のリン化ガリウム (GaP) 結晶板を8つのピースに分割し、その方位が回転するように貼り合わせた素子を持ちいて、放射状の電場ベクトルをもつテラヘルツビームを発生させる方法である。第二は、可視光用の1/2波長板を分割し、励起パルスの偏光を空間制御する手法である。このビームを(111)面の閃亜鉛鋅型半導体結晶板に照射するとベクトルテラヘルツビームを発生させることができる。

これらの手法によって発生したテラヘルツベクトルビームの偏光分布特性と集光点での電場分布を評価し、理想的なベクトルビームとのモード一致率が90%を越える擬ベクトルビームが得られたことを示した。この手法では、放射状の電場分布をもつRadial beamと円環状の電場分布をもつAzimuthal beamの両方を発生させることができる。Radial beamは集光点で縦電場を生じるが、それを明瞭に示した。一方、Azimuthal beamは集光点で縦磁場を生じる。ここで、集光面における電場ベクトルの時空間分布データから縦磁場成分を再構成する手法を見いだした。この手法により、集光点近傍で、縦磁場が生じていることを示した。

第6章では、金属ワイヤによるテラヘルツ波の導波の原理と実証について述べている。Radial beamを金属ワイヤに集光したところ、広帯域かつ高効率で結合できることを確認した。実験で得られた結合効率は最大66%に達している。結合効率を支配する要因について、ワイヤ径、集光のNA依存性についてシミュレーションにより考察し、結合効率は主に、ベクトルビームとSommerfeld波のモード整合係数によって決まると結論した。

第7章では、本研究のまとめを行い、今後の展望について述べている。特に展望として、ワイヤガイドによるY分岐とテーパーワイヤによる集光特性について数値計算を行い、センサや近接場トポグラフィーなどへの応用の可能性について具体的に議論している。

本論文に明記されているように、5章に記載されている成果の中で、GaP結晶分割素子による、ベクトルビーム発生は、共同研究者今井亮氏の寄与が主であり、Zheng Zhu氏は補助的な寄与をしたものであるが、説明の整合性をとるために合わせて説明が記載されている。テラヘルツ波領域におけるベクトルビーム発生とその評価、さらにそれを用いた金属ワイヤによる導波技術の開拓という本研究全体の成果に対し、Zheng Zhu氏が研究を主導し中心的な貢献をしている。

以上のように本研究において、テラヘルツ波領域でのベクトルビーム発生について新しい手法を提案し、それを用いて、金属ワイヤによるテラヘルツ波の広帯域高効率低損失導波を初めて実証した。この成果は、電磁波の伝播や導波特性の基礎的研究としての意義に加え、テラヘルツ電磁波を用いた計測や物質制御の新しい技術を拓くものとなることが期待される。本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

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。