

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 朱 亦鳴

ガリウムヒ素 (GaAs) に代表される化合物半導体は、その特異なバンド構造のために、電界を増加させるとともに電流が減少するという微分負性抵抗を示す。この微分負性抵抗を利用したガンダイオードは、ミリ波・サブテラヘルツ領域でもっとも一般に用いられている発振器であり、電子の伝導に関する研究は 1960 年代より行われてきたが、そのダイナミクスに関しては未だ不明な点が多い。本論文は、"Femtosecond Carrier Dynamics in Bulk GaAs under High Electric Fields Investigated by Time Domain Terahertz Spectroscopy" (「時間分解テラヘルツ分光法を用いた高電界下バルク GaAs 中のフェムト秒キャリアダイナミクスに関する研究」) と題し、バルク GaAs 中の電子の伝導ダイナミクスを時間分解テラヘルツ (THz) 分光法という新しい手法により実験的に論じたものである。論文は 6 章より構成されており、英文で記されている。

第一章は序論であり、ミリ波・テラヘルツ領域における光源技術の現状の概要を説明するとともに、従来から議論されてきたガン効果に関する研究をレビューし、谷間遷移により微分負性抵抗が発生する機構などを紹介した後、本研究の目的を明らかにしている。

第二章では、本研究で用いている時間分解 THz 分光法の原理や実際の実験系の概要について説明している。特に、観測される THz 電磁波の波形が、電子の加速度に比例した信号であること、さらに THz 電気光学サンプリング法について、測定原理や感度スペクトルの帯域などについて説明している。

第三章は、フェムト秒光パルスによる光励起直後の電子の加速について検討を行っている。GaAs のバンド構造は、電子有効質量の軽い Γ 谷に隣接して有効質量の重い L 谷、X 谷を持ち、高電界により電子を加速すると Γ 谷より L 谷、X 谷に電子が遷移するため、光励起直後にいったん加速された後、大きな減速が生じる (速度オーバーシュート効果)。本論文では、光励起直後の加速度の大きさに着目し、加速電界が 20 kV/cm の領域では電子加速が電界に比例して増大するのに対して、電界が 50 kV/cm 以上の領域では加速度の大きさが飽和し、さらに減少に転ずることを見いだしている。この加速度の減少は、古典的には電子有効質量の増加と解釈することができ、その原因が高電界領域での強いバンド混合効果によるものであることを明らかにしている。

第四章では、光励起直後の過渡速度について議論を行っている。一般に、THz 電磁波の波形は電子の加速度に比例しているため、それを積分することにより、電子の過渡速度に関する情報が得られる。本研究では最大エントロピー法により精密に時間原点を決定するとともに、THz 波形を積分したところ、光励起された時間原点において有限の初速度を持っているという古典力学では説明が困難な現象を見いだした。この光励起直後の有限の初速度の起源について議論を行い、試料中に発生する変位電流、または電子波動関数の干渉効果によるものである可能性が高いと結論している。

第五章は、バルク GaAs をガン発振器に応用する上で重要な微分負性抵抗のスペクトルについて議論を行っている。時間分解 THz 分光法は、その測定原理より、電子系の電界に対するステップ応答の測定と等価になる。従って、電子系が放射した THz 電磁波は電子系の伝導度に関する情報を含んでおり、利得と損失に関する議論が可能になる。この手法を用いて、GaAs が持つ微分負性抵抗のスペクトルを求めたところ、50 kV/cm 以下の領域では遮断周波

数が電界とともに増加し、50 kV/cm 以上の領域では約 1 THz で飽和することを見いだした。この遮断周波数はモンテカルロ計算で予測されていた値（数百 GHz）よりも高い。さらに、遮断周波数の値や温度依存性より、L 谷、X 谷から光学フォノンを放出して電子が Γ 谷内でエネルギーを緩和する過程が遮断周波数を決定していることを明らかにしている。

第六章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上のように本論文は、多谷バンド構造を有するバルク半導体中の電子伝導について、時間分解テラヘルツ分光法という新しい手法を用いることにより、電子の加速質量や過渡速度など伝導ダイナミクスに関する新しい知見を提供するとともに、ガン発振器への応用に重要な微分負性抵抗スペクトルの新しい決定法を提案し、さらに利得遮断周波数が決定される機構を明らかにしており、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。