

審査の結果の要旨

氏名 酒瀬川洋平

半導体超格子中に形成されるミニバンドに電界を印加すると、電子は周期的なトンネル伝導を行う。ブロッホ振動と呼ばれるこの特異な伝導を固体テラヘルツ光源の実現に応用しようと言う試みが1970年以来、40年間続けられてきた。しかし、その実現を阻んでいる最も重要な要因が、高電界ドメインの発生による素子の内部電界の不均一化の問題である。本論文は、”Terahertz resonators and their applications to large-amplitude operation of semiconductor superlattices” (「テラヘルツ共振器とその半導体超格子交流大振幅動作への応用に関する研究」) と題し、半導体超格子を共振器構造と組み合わせ、外部よりサブテラヘルツの大振幅交流電界を印加して、高電界ドメインの発生を抑制するとともに、さらにブロッホ発振に導くために適したテラヘルツ帯共振器の設計に関して論じたものである。論文は6章より構成されており、英文で記されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べられている。半導体超格子中のブロッホ振動電子が持つ利得を用いて電氣的駆動による発振器(ブロッホ発振器)を実現するのは固体物理学上の大きな夢であり、かつ固体テラヘルツ光源を実現するという観点からも意義深い。しかし、実際には超格子が有する微分負性抵抗のため、電荷密度の不均一が誘起され高電界ドメインが発生し、ブロッホ発振を得ることは非常に困難である。本研究では、ブロッホ発振器の実現には、超格子中の高電界ドメインの発生を抑制することと、超高 Q 値/体積比を有する適切な共振器が必要であると述べている。

第2章では、まず微分負性抵抗を有する系で負の誘電緩和現象のため、高電界ドメインが形成される問題について説明している。次に、超格子のミニバンド中の電子を大振幅のサブテラヘルツ交流電界で駆動することにより、テラヘルツ帯の微分伝導度を負に保ったまま、直流付近の微分伝導度を正に転じて、高電界ドメインの発生を抑制するという交流大振幅動作理論の概要を説明している。さらにこの理論に基づき、現実的な超格子構造、既存の光源、共振器構造の組み合わせにおいて、交流大振幅動作を用いた高電界ドメイン抑制の可能性を検討している。

第3章では、第2章で説明した超格子試料とアンテナ共振器の組み合わせで交流大振幅駆動の実験を行っている。具体的には、超格子にアンテナ電極を取り付けた試料を試作し、そこにジャイロトロンからのサブテラヘルツ電磁波を照射しながら電気伝導の測定を行い、その結果ミニバンド中の伝導電流が抑制される効果を観測している。観測された電流と理論計算との比較により、超格子活性層には最大約1.4 kV/cm (1.3 meV/周期) のサブテラヘルツ電界が誘起され、それにより直流における負性微分伝導率が減少していることを明らかにしている。今後、素子構造や作製プロセスの改良により、正の直流微分伝導率領域への到達とそれによるドメイン抑制が十分可能であると述べている。

第4章では、外部から導入する大振幅交流電界を超格子活性層中に閉じ込めて電界振幅を高めるとともに、超格子の利得により発振器を実現するのに適した共振器として、フォトニック結晶

微小共振器の実現に向けて検討を行っている。具体的には、テラヘルツ周波数帯 TM 偏光に対してフォトニックバンドギャップを得るために、金属/超格子活性層/ドーパ基板からなる導波路構造の上部金属電極層を、ハニカムパターン状に孔を形成したフォトニック結晶電極としたものである。この試料の特性を時間領域テラヘルツ分光法で調べることにより、フォトニックバンドギャップの形成を検証している。特に、素子に均一なバイアス電圧を印加するために、超格子とフォトニック結晶電極の間に半透明 Ti 電極を挿入したところ、Ti 層が導波路モードと表面漏れモードの結合を切り離す効果を有することを発見している。さらに Ti 層の厚さの最適化によって、高い消光比を持つ明瞭な TM 偏光に対するテラヘルツ帯フォトニックバンドギャップを得ている。

第5章では、超格子中でブロッホ振動する電子が有する散乱を介した小さな利得により、発振器を実現するために適している超高 Q 値/体積比を有するフォトニック結晶微小共振器を、三角格子フォトニック結晶電極/半導体活性層/金属からなる導波路構造において設計している。まず、フォトニック結晶電極に設ける孔の大きさと半導体コアの厚みを適切に設計することにより、フォトニックバンドギャップが実現できることを示している。また共振器の Q 値が、金属内への電磁波の侵入による伝導損失とフォトニックバンドギャップによる漏れ損失の抑制効果のバランスにより決まることを明らかにし、さらに半導体活性層の厚みの設計により Q 値を最大化している。また、設計したフォトニック結晶微小共振器構造は、既存の微小共振器構造と比較して約 1/10 の小さなモード体積をもつ共振器であり、ブロッホ発振器の実現に有効であるのみならず、テラヘルツ帯量子カスケードレーザに適用することで駆動電力を 1~2 桁下げることが期待できると述べている。さらに、半導体活性層の厚みを増加することで放射効率も増大でき、このフォトニック結晶微小共振器を超格子の交流大振幅動作に応用する可能性も示している。

以上のように本論文は、半導体超格子を用いたブロッホ発振器の実現を阻んできた高電界ドメイン発生の問題に対して、共振器と組み合わせた超格子構造への強いテラヘルツ電磁波の照射による交流大振幅動作が有効であることについて基礎的な検証をするとともに、ブロッホ発振の実現に適したテラヘルツ帯共振器の設計に関して重要な知見を得たものであり、電子工学に寄与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。