

氏名	鶴田 修一
学位の種類	博士 (工学)
授与報告番号	(甲)第 3402 号
学位授与年月日	平成 26 年 9 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項
学位論文名	超高速分光法による <i>i</i> -GaAs/ <i>n</i> -GaAs 及び GaSb/GaAs エピタキシャル構造からのテラヘルツ電磁波放射に関する研究
論文審査委員	主査 中山 正昭 副主査 細田 誠 副主査 金 大貴

## 論文内容の要旨

テラヘルツ電磁波とは、電波と光波の間の周波数領域の電磁波であり、電波の透過性と光波の直進性を同時に有することから、様々な分野でのセンシング応用に向けて研究が盛んに行われている。テラヘルツ電磁波の発生方法として、光伝導アンテナや非線形光学結晶を用いた手法が挙げられるが、本研究では、実用化に向けた条件の一つである簡便性の観点から、半導体表面からのテラヘルツ電磁波放射に着目した。本論文では、*i*-GaAs/*n*-GaAs エピタキシャル構造と GaSb/GaAs エピタキシャル構造を対象とし、フェムト秒パルスレーザー励起によるテラヘルツ電磁波の発生と制御について、超高速分光法（時間分解テラヘルツ電磁波測定法）を用いて系統的な研究を行った成果をまとめた。

第 1 章では、本研究の背景、目的、並びに、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、本研究で用いた実験手法及び解析手法について、時間分解テラヘルツ電磁波測定法とデータのフーリエ変換解析法を中心に述べた。

第 3 章では、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造 (*i*-GaAs 層厚が 200、500、800、1200nm の 4 種類の試料) におけるコヒーレント縦光学 (longitudinal optical: LO) フォノンからのテラヘルツ電磁波 (周波数: 8.8THz) の増強機構に関する研究成果について述べた。まず、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造特有の *i*-GaAs 層の内部電場について、光変調反射スペクトルで観測される Franz-Keldysh 振動の解析を行って評価した。次に、テラヘルツ電磁波強度が、*i*-GaAs 層厚に顕著に依存することを示した。テラヘルツ電磁波強度の放射体積効果及び有効励起強度の補正を行うことにより、補正後の強度 (振幅の 2 乗) が *i*-GaAs 層の内部電場の 2 乗に比例することを見出し、*i*-GaAs 層内の内部電場によって引き起こされる LO フォノンの初期分極がテラヘルツ電磁波の増強の原因であることを明らかにした。

第 4 章では、*i*-GaAs/*n*-GaAs 構造における LO フォノン-プラズモン結合 (LO phonon-plasmon coupled: LOPC) モードに関する研究成果について述べた。LOPC モードの電子密度依存性の計算結果とテラヘルツ電磁波測定の実験結果との比較を行い、LOPC モード特有の上分枝モードと下分枝モードが観測されていることを見いだした。さらに、LOPC モードの周波数がポンプ光強度のみに依存することから、LOPC モードが *i*-GaAs 層内で形成されていることを明らかにし、LOPC モードの減衰時間 (1~2ps) は *i*-GaAs 層から *n*-GaAs 層へのキャリアの掃き出し時間を反映していることを示した。

第 5 章では、GaSb/GaAs 構造における下部の GaAs 層のコヒーレント LO フォノンの生成機構に関する研究成果について述べた。まず、ラマン散乱スペクトルの測定から、GaAs 層からの LO フォノンが観測されないこと、即ち、GaAs 層が光学的にマスクされていることを示した。一方、テラヘルツ電磁波の測定結果から、GaSb 層と GaAs 層の両方のコヒーレント LO フォノンが観測されることを見いだした。このことから、GaAs 層のコヒーレント LO フォノン生成機構は、ポンプ光の照射により生成されたキャリアによる電場遮蔽効果に起因した表面ポテンシャル変調が、下部の GaAs 層も含めた領域で生じて、それがコヒーレント LO フォノン生成のトリガーとなっていることを明らかにした。

最後に、第 6 章では、本研究で得られた成果を総括して結論とした。

## 論文審査の結果の要旨

テラヘルツ (THz) 電磁波は、分子振動数領域であるために、化学、バイオ、医療、環境分野における高感度センシングのための光源として注目を集めている。これまで、多様なテラヘルツ電磁波発生機構が提案されているが、本論文の著者は、応用において重要な要素の一つである簡便性の観点から、半導体エピタキシャル構造の表面からの THz 電磁波放射に着目している。本論文では、単純な構造の *i*-GaAs/*n*-GaAs 及び GaSb/GaAs エピタキシャル構造を対象として、フェムト秒パルスレーザー励起による THz 電磁波放射について、時間分解 THz 電磁波分光法を用いて行った系統的な実験結果とその解析結果についてまとめられている。

まず、時間分解 THz 電磁波測定のために、励起光源としてパルス時間幅 50 fs の波長可変フェムト秒パルス Ti:sapphire レーザーを用い、検出系に高周波数 (約 10THz) まで感度を有する光伝導ダイポールアンテナを用いた光ゲート法による測定システムを構築し、フーリエ変換に基づく THz 電磁波波形の解析方法を確立している。

次に、*i*-GaAs 層厚が異なる 4 種類 (200、500、800、1200nm) の *i*-GaAs/*n*-GaAs エピタキシャル構造を対象として、THz 電磁波を系統的に測定し、コヒーレント縦光学 (longitudinal optical: LO) フォノンからの THz 電磁波 (周波数: 8.8THz) の強度が、*i*-GaAs 層厚に顕著に依存することを見いだしている。その要因を明らかにするために、LO フォノン分極の観点から、*i*-GaAs 層の内部電場に着目し、光変調反射スペクトルで観測される Franz-Keldysh 振動の解析により、*i*-GaAs 層の内部電場を定量的に評価している。各試料におけるコヒーレント LO フォノンからの THz 電磁波放射効率が、*i*-GaAs 層の内部電場強度の 2 乗に比例して増強されることを明確に示し、その増強機構が、*i*-GaAs 層の内部電場による LO フォノンの初期分極の増大によるものであることを明らかにしている。

続いて、上記の試料を対象として、THz 電磁波の励起強度依存性を系統的に測定し、強励起条件特有の新たな 2 つの THz バンドを見いだしている。GaAs の LO フォノン-プラズモン結合 (LO-phonon-plasmon coupled: LOPC) モードの電子密度依存性の計算結果と実験結果との比較を行い、その 2 つの THz バンドが、LOPC モードに起因することを明らかにしている。さらに、LOPC モードの周波数がポンプ光強度にのみ依存することから、*i*-GaAs 層を走行する瞬間的過渡電流がプラズモンとして作用してコヒーレント LO フォノンと結合し、瞬間的過渡電流の *i*-GaAs 層からのスイープアウト時間が LOPC モードの寿命 (1~2ps) を支配していると結論している。

最後に、GaSb/GaAs エピタキシャル構造を対象として、ラマン散乱スペクトル、及び、THz 電磁波の測定を系統的に行い、ラマン散乱スペクトルにおいて観測されない下部の GaAs 層の LO フォノンが、THz 電磁波では観測されることを見いだしている。このことから、光学的にマスクされた GaAs 層におけるコヒーレント LO フォノンの生成機構は、ポンプ光の照射により生成されたキャリアの電場遮蔽効果に起因した瞬間的表面ポテンシャル変調が下部の GaAs 層まで到達し、コヒーレント LO フォノン生成のトリガーとして作用しているためであると結論している。

以上を総合して、本論文は、半導体エピタキシャル構造における THz 電磁波放射の機構と制御に関して重要な知見を提示しており、光物性と光デバイスの両分野の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文の著者は、博士 (工学) の学位を受ける資格を有するものと認める。