

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	篠北 啓介
論文題目	高強度テラヘルツパルスにより誘起された半導体非線形光学現象		
(論文内容の要旨)			
物質と光の非線形な相互作用は、基礎物理や工業応用において重要である。半導体や原子気体において共鳴した光を用いた場合、AC シュタルク効果、ラビ振動、Autler-Townes 分裂や電磁誘導透明化などの魅力的な非線形現象が発現する。非共鳴光を用いた場合には、越閾イオン化や高次高調波発生などの摂動論で説明することのできない非常に非線形なふるまいを示す。近年発達したテーブルトップの高強度テラヘルツ波光源は低エネルギー遷移を非線形な領域におしやり、さまざまな物質における非線形輸送現象を調べるのが可能になった。本論文では世界最高強度のテラヘルツ波パルスを半導体量子井戸構造の研究に適用して、半導体における非線形光学現象に新たな知見を与えた。 まず、電場強度 0.1MV/cm 以下のテラヘルツ波パルスを用いたテラヘルツ波励起-光プローブ分光により、GaAs/AlGaAs 多重量子井戸における励起子やバンド端の非線形なふるまいを詳細に調べた。高強度テラヘルツ波パルスの照射で励起子吸収は大きく変調を受けた。テラヘルツ波パルスの電場強度が弱いときは AC シュタルク効果によって励起子吸収が低エネルギー側にシフトした。電場強度が強くなるにつれて、非摂動論的な非線形光学現象である動的フランク-コンドン効果によるバンド端の高エネルギーシフトに伴い、励起子エネルギーは高エネルギーシフトを示すことを実験的に明らかにした。さらにテラヘルツ波パルスの電場強度を強くすると励起子吸収は抑制されて幅が広がることから、高電場下では励起子が不安定化してイオン化することを実験で示した。 次に、より非線形な光学現象を調べるため、1MV/cm の高強度テラヘルツ波パルスを用いた発光測定を行い、高電場下でのバンド間遷移に由来する励起子発光の観測に成功した。キャリア生成に伴う発光は、テラヘルツ波の電場によってコヒーレントに加速されたキャリアが高い運動エネルギーを得て、ピコ秒の時間領域で衝突イオン化過程が繰り返され、キャリア数が 3 桁増幅したことを示している。波数空間での電子の運動を考えた衝突イオン化に基づく現象論的なモデルによって数値計算を行い、実験結果を説明することに成功した。 さらに、可視領域の連続光と高強度テラヘルツ波パルスを用いた時間分解発光測定を行い、非ドープの高品質 GaAs/AlGaAs 量子井戸における光キャリアダイナミクスを調べた。定常的に光励起した試料にテラヘルツ波パルスを照射すると瞬間的に発光が増大することを明らかにした。AlGaAs 層の不純物準位に束縛された光励起キャリアをテラヘルツ波の高電場がトンネルイオン化させていることを、発光強度のテラヘルツ波の電場強度依存性と計算との比較から示した。従来の光学的手法では測定することができなかった束縛された光キャリアを高強度テラヘルツ波パルスによりトンネルイオン化させることで、束縛準位の寿命や密度、非輻射緩和時間を実験的に見積もることに成功した。 最後に、これらの実験結果は、数 meV から数 eV の束縛エネルギーをもつ準位に束縛されたキャリアが高電場下で自由キャリアとなる過程を考慮することで、包括的に理解できることを示した。			

(論文審査の結果の要旨)

物質と光の相互作用は長波長の光に対して非線形性が顕在化することから、高強度テラヘルツ波パルスを用いた研究が近年になって行われるようになった。本論文は、世界最高強度のテラヘルツ波パルスとさまざまな分光手法を駆使し、半導体における3つの新規な非線形光学現象を実験的に明らかにしたものである。これらの非線形光学現象を説明するために、衝突イオン化やトンネルイオン化のような物理モデルを提案し、現象を定量的に説明して新たな知見を得ることに成功している。またこれらの結果を、高電場下での自由キャリア生成という観点から包括的に理解できることを明らかにしている。

GaAs 多重量子井戸において、高強度テラヘルツ波パルスの照射下で励起子やバンド端が非線形なふるまいを示すことを見だし、過渡吸収分光によって励起子吸収のエネルギーシフトを詳細に調べた。電場強度が強くなるにつれて励起子吸収は低エネルギー側から高エネルギー側にシフトすることを実験的に明らかにした。この結果から、AC シュタルク効果と非摂動論的な非線形光学現象である動的フランチケルディッシュ効果が競合していることを示した。さらに高電場では、励起子がイオン化して自由電子正孔対が生成することを明らかにした。

1MV/cm の高強度テラヘルツ波パルスを用いた発光測定を行い、高電場下でのバンド間遷移に由来する励起子発光の観測に成功した。このキャリア生成に伴う発光は、テラヘルツ波の電場によって散乱なしに加速されたキャリアが高い運動エネルギーを得て、ピコ秒の時間領域で衝突イオン化過程が繰り返されたためであることを、波数空間での電子の運動を考慮した衝突イオン化に基づく現象論的なモデル計算で説明することに成功した。テラヘルツ波パルスを用いた衝突イオン化の研究は、これまでは吸収測定で行われており、発光測定に着目して高電場下でのバンド間遷移を直接明らかにした点は高く評価される。

可視領域の連続光と高強度テラヘルツ波パルスを用いた時間分解発光測定を行い、非ドープの高品質 GaAs/AlGaAs 量子井戸における光キャリアダイナミクスを詳細に調べた。定常的に光励起した試料にテラヘルツ波パルスを照射したときに瞬間的な発光の増大を観測し、AlGaAs 層の不純物準位に束縛された光励起キャリアの高電場でのイオン化過程を明らかにした。この高強度テラヘルツ波パルスによるトンネルイオン化を利用して、束縛準位の寿命や密度、非輻射緩和時間を実験的に見積もることに成功した。従来の光学的手法では測定できなかった束縛キャリアの定量的な測定手法を開拓したことは注目に値する。

以上のように、本論文は、高強度テラヘルツ波パルスを用いて半導体の新規な非線形光学現象を明らかにした先駆的な研究である。また、論文に報告されている結果は、自由キャリアの生成メカニズムを包括的に示したものであり、当該分野で大きな意義を持つものである。さらに、コヒーレント伝導のような非線形伝導現象にも適用が可能であり、さらなる発展が期待される。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た。また、平成 25 年 1 月 15 日論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日： 平成 25 年 3 月 31 日以降