

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	谷 峻太郎
論文題目	超高速レーザー分光法を用いた非平衡電子系における散乱過程の研究		
(論文内容の要旨)			
<p>半導体における電子系の運動量緩和過程に関する知見は、キャリアの輸送現象を特徴づけることから半導体デバイス開発のために重要であるとともに、クーロン相互作用する多体系のダイナミクスという基礎物理の観点からも必要不可欠である。平衡状態近傍にある低密度な電子系では、フォノン散乱や不純物散乱が運動量緩和過程において支配的であることが知られている。一方、高密度電子系においては電子系内部での散乱が重要になると考えられているが、電子と正孔が共存する系において運動量緩和に寄与する散乱過程は未だに明らかになっていなかった。また、基礎物理・産業応用の点から重要性の高い、極めて強い電場下での非平衡電子系の散乱過程も未解明であった。従来の電流電圧特性並びにホール測定を用いた伝導度測定では、測定装置の時定数に比べ運動量緩和時間が遥かに短いため、時間的に平均された情報しか得られなかった。このため、運動量緩和機構の素過程を明らかにすることは困難であった。</p> <p>本研究では、超短パルスレーザー分光法を用いて電子正孔対のダイナミクスをサブピコ秒の時間分解能で測定することにより、運動量緩和に寄与する散乱の素過程を明らかにした。特に、フェムト秒超短レーザーパルス光とコヒーレントテラヘルツパルス光を組み合わせた実験装置を構築することで、電子温度と格子温度が異なる非平衡状態下における電子正孔系の運動量散逸過程の測定を可能にした。</p> <p>まず、テラヘルツ時間領域分光法を用いて高密度に光励起された半導体電子正孔対の運動量散逸機構を測定した。これまでもテラヘルツ時間領域分光法を用いた高密度光励起半導体における電子正孔対のダイナミクスの研究例はあったが、フォノン散乱と電子系内部での散乱の寄与は明確に分離されておらず、とりわけ電子系内部でのクーロン散乱機構は明らかになっていなかった。そこで本研究ではバンドギャップが大きい半導体の一つであるZnSeを対象として、2光子励起と1光子励起を組み合わせることで、電子正孔対密度を5桁以上に渡って変化させ、低密度領域から高密度領域における電子正孔対の運動量緩和過程を系統的に測定した。この結果、電子正孔系の運動量緩和レートが、ある自由電子正孔対密度において極大となることを見いだした。さらに、電子と電子正孔系との散乱時間を、実効的に多体効果を含んだ理論モデルをもちいて数値計算し、実験結果を定量的に再現した。この結果、電子-プラズモン散乱が電子の運動量緩和に支配的な影響を与えていることが明らかになった。</p> <p>次に、高電場下での電子正孔対のキャリアダイナミクスを明らかにするために、単純なバンド構造を持つグラフェンにおいて、高強度テラヘルツパルス光励起後の過渡吸収測定を行った。大気プラズマ法を用いて高強度テラヘルツパルス光を発生させることにより、300kV/cmの電場下において50フェムト秒の時間分解能での光吸収測定が可能になった。近赤外光領域で 16 %以上におよぶ大きな吸収飽和を観測し、この吸収飽和がテラヘルツ電場強度に対して非線形な依存性を示すことを見いだした。この結果を説明するために、衝突イオン化とオージェ再結合を取り入れた半古典ボルツマン方程式を用いた数値計算をおこない、実験結果を定量的に再現することに成功した。この結果、グラフェンのキャリアは高強度テラヘルツ光電場によって0.5 eV 以上のエネルギー領域まで加速され、衝突イオン化が高効率で起き、キャリア数が増大していることが明らかになった。さらに、衝突イオン化によって生じる運動量緩和が輸送現象に大きな影響を与えることを示した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は電子と正孔が共存している系において普遍的な問題である運動量緩和のメカニズムに関する実験的研究について述べたものである。測定対象として、電子正孔間の強いクーロン相関が発現することが期待される ZnSe と高電場下での応用が期待されているグラフェンを取り扱っている。超短パルスレーザー光や高強度テラヘルツパルス光で電子を光励起すると、比熱の小さい電子系は励起直後に高温度に励起されるのに対し、格子系は電子-格子相互作用を通して間接的に励起されるため、電子温度と格子温度が著しく異なる非平衡状態が形成される。このような非平衡条件下における電子と正孔が共存した系での運動量散乱機構は明らかになっていなかった。本論文では、非平衡条件下における電子と正孔の運動量緩和過程を超高速度レーザー分光法によって明らかにした。特に、時間領域テラヘルツ分光法およびフェムト秒過渡吸収分光法を用いることで運動量緩和の素過程を上回る時間分解能で電子系のダイナミクスを測定し、数値シミュレーションと照らし合わせる事で電子系のダイナミクスを明らかにした点に特長がある。この結果、これまで未解明であった高密度かつ高温な電子正孔系の運動量緩和過程を明らかにするとともに、自由電子正孔対密度に依存して運動量緩和の増大が起きることを見いだした。さらに、数値シミュレーションによって運動量緩和増大が起こる密度と電子温度の間に系の詳細によらずに成り立つ普遍的な表式を与えた。この結果は、クーロン相互作用する多体電子正孔系を統一的に理解する上での大きな足がかりを与えるものであり、重要な成果である。また、高電場下のグラフェンにおいて高効率に衝突イオン化がおきることを世界で初めて実験的に明らかにした。これは今後の発展が期待されるグラフェンの基礎物理・産業応用にとって重要な知見である。さらに本研究で確立された高強度テラヘルツパルスとフェムト秒過渡吸収分光法を用いた高電場下での高時間分解能のキャリアダイナミクス測定法は、グラフェンに限らず、高電場・高周波領域でのキャリアダイナミクス研究において、今後、重要な役割を果たすことが期待される。

以上のように、本論文は超高速度レーザー分光法を用いて高密度電子正孔対や高電場下におけるキャリアの超高速度ダイナミクスを明らかにした先駆的研究である。また論文に報告されている結果は、高密度や高電場下での一体近似の取り扱いの妥当性を定量的に示すものであり当該分野において大きな意義を持つものであるとともに、今後の高電場・高密度領域における研究を行う上での足がかりとなることが期待される。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る。また、平成26年1月7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。なお、本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 平成26年 6月 23日以降