



Title	Nonequilibrium Spatiotemporal Carrier Dynamics in One-dimensional Electron-Hole Systems
Author(s)	石川, 陽
Citation	
Issue Date	
Text Version	none
URL	http://hdl.handle.net/11094/46427
DOI	
rights	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/repo/ouka/all/>

氏名	石川 哲陽
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 20539 号
学位授与年月日	平成 18 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文名	Nonequilibrium Spatiotemporal Carrier Dynamics in One-dimensional Electron-Hole Systems (一次元電子-正孔系における非平衡時空間キャリアダイナミクス)
論文審査委員	(主査) 教授 小川 哲生 (副査) 教授 阿久津泰弘 教授 野末 泰夫 教授 菊池 誠 助教授 浅野 建一

論文内容の要旨

半導体中に光励起された電子と正孔のダイナミクスについては、光エレクトロニクスへの応用を目標に、以前から多くの研究が為されてきた。特に近年では、試料の加工技術の進歩により、系の量子状態を人為的に制御できるようになりつつある。例えば、一次元系である量子細線の研究が、レーザーへの応用などを目標に活発に実験されている。一方、電子-正孔系は、非平衡系の基礎的研究の観点からも興味深い。例えば、キャリア密度が小さいとき、エネルギー緩和とともに励起子が形成される。また、高密度では、臨界温度以下まで緩和が進むと、電子と正孔が空間的に凝縮し、電子正孔液滴が形成される。このように、電子-正孔系では様々な緩和現象が観測されている。電子-正孔系における緩和メカニズムの詳細を量子論的に理解することは、将来、励起子形成や電子正孔液滴形成を研究する上で避けては通れない課題であるが、現時点で理論的には充分には理解できていない。そこで、本研究では、電子-正孔系における緩和ダイナミクスの量子論を構築し、一次元系に適用して数値的に緩和メカニズムを調べた。そして、キャリアの微視的な散乱過程が緩和ダイナミクスに与える影響と、緩和が光学応答変化とどのように関係しているかを明らかにした。

本研究では、LA フォノン系、フォトン系と結合した電子-正孔系を考える。励起子形成や電子正孔液滴形成が実現する時間スケールでは、キャリア-キャリア散乱に加えて、キャリア-LA フォノン散乱も考慮する必要がある。LA フォノン系は熱浴であると仮定し、射影演算子の方法を用いて、緩和を記述する時間発展方程式を導出した。また、キャリアの空間伝播も考慮するため、実空間情報も扱える定式化を行った。その結果、半導体ルミネセンス方程式と量子ボルツマン方程式の二つの部分からなる時間発展方程式を微視的に導出することができた。

導出した方程式を一次元系に適用し、ふたつの場合について数値計算を行った。ひとつは、キャリア密度が空間的に均一になるように一様励起した場合である。緩和に対して支配的な微視的散乱過程が、キャリア-キャリア散乱からキャリア-LA フォノン散乱へと移行することを明らかにした。散乱過程の移行は、励起子からの発光強度変化にも現れることが分かった。つまり、直接観測できないキャリア散乱などの微視的過程と、実験で観測できる光学応答変化の関係性を明らかにできた。もうひとつの場合は、局所的に電子正孔対を生成する局所励起の場合である。この場合は、キャリアの空間伝播に伴う局所的なキャリア密度の減少が起こる。それにもよって、緩和の初期過程が遅くなり、発光スペクトル強度も減衰する。これは一様励起の場合と大きく異なる点である。

本研究で行った、緩和の時空間ダイナミクスを記述し得る量子論の研究は、励起子形成や電子正孔液滴形成などの非平衡現象に対する研究への足がかりになると考えている。

論文審査の結果の要旨

光励起直後の半導体は、熱平衡から遠く離れた非平衡励起状態になっている。この非平衡な電子・正孔系は、環境としてのフォノン系と相互作用することによって、エネルギー散逸を伴いながらバンド内緩和し、バンド間再結合寿命までの時間スケールで準熱平衡状態に一旦落ち着く。本博士論文は、この電子と正孔のバンド内緩和過程の時空間ダイナミクスを理論的および数値的に精査したものである。電子と正孔は異なる符号の電荷をもつフェルミ粒子であるので、斥力だけでなく引力相互作用も取り入れた量子力学的手法で取り扱わなければならない。そのために、緩和を引き起こす散乱過程として、フォノン散乱だけでなく、粒子間のクーロン散乱も取り入れる必要があり、パウリ排他律も関係してくる。よって、考察する現象は散逸開放系の量子多体問題のダイナミクスとなる。

本博士論文では、擬1次元半導体でのバンド内緩和ダイナミクスを、音響フォノンを熱浴とした開放系の量子力学によって考察し、クーロン相関を記述する半導体ブロッホ方程式と散逸・拡散を表す量子ボルツマン方程式との連立型時空間発展方程式を導いた。このような純量子力学的な時空間キャリア緩和ダイナミクスは、本博士論文によって初めて微視的に定式化された。この連立微積分方程式を大規模数値計算することにより、粒子密度と分極密度のWigner 統計分布の時空間発展や、光学スペクトルの時間変化を追跡した。本研究では、低エネルギー励起で低密度励起における量子緩和ダイナミクスに焦点を当て、緩和とクーロン相関との関連を解明した点、時空間量子ダイナミクスを追跡した点、バンドギャップ繰り込み効果と状態充填効果の密度および時間依存性を明らかにした点が大きな成果である。特に、キャリア間クーロン散乱率と音響フォノン・キャリア散乱率が同程度なのにもかかわらず、それぞれに起因する緩和過程はキャリアの運動量分布関数の時間発展に依存するために、時間スケールの棲み分けが生じることが解明された点が重要な発見である。

このような励起半導体中の緩和現象は、非平衡量子統計物理学からの興味だけでなく、半導体輸送デバイスや光デバイスの高速応答を探る応用面からも重要で、理学・工学問わずに非常に重要な研究テーマである。従来の半古典近似や緩和定数近似のような現象論ではなく、量子ダイナミクスを微視的立場から解明する理論を構築した点は、本研究分野の今後の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。