

微細構造系での電子状態

大城 和宣 (理工学・松浦 満)

研究の目的

半導体中の電子及び正孔を1次元、2次元及び3次元的に閉じ込める低次元系は、それぞれ半導体量子井戸系、半導体量子細線系、半導体量子ドット系と呼ばれている。これらの系では、電子及び正孔が量子閉じ込め効果を受けるため、バルクと異なった性質をもつことが知られるようになり、新しい物性、新しいデバイスという観点から基礎、応用の両面で研究が盛んに行われている。その中でも、全ての方向に電子と正孔を閉じ込められる量子ドット系は電子状態の離散化、状態密度の集中及び非線形感受率の増大などの性質が顕著に現れ、レーザーや光スイッチ、光メモリなどの光学素子への応用が期待されている。

一般に物質中の電子系と格子系は互いに関与しあっており、物質の性質には電子系と格子系の両方が関わっている。バルク半導体系の光学的性質には電子と正孔の束縛状態である励起子と縦光学フォノン(LOフォノン)が深く関与していることが知られており、光吸収による励起子発光もLOフォノンによる緩和が重要な役割を演じる。また、非線形光学効果において重要な散乱過程も物質のエネルギー準位構造や緩和過程によって敏感に影響を受ける。したがって、電子系と格子系の相互作用についての知見を得ることは、物質の光学的性質を理解を深めるために最も重要なことの一つである。

微細構造をもつ系では、系の対称性の違いから、フォノンのモードがバルクと異なる。したがって微細構造を持つ系の物性を知るために、その系の特徴を踏まえた電子(又は励起子)-フォノン相互作用の議論が必要となる。しかし、これまでの電子-LOフォノン相互作用の取り扱い方は系の特徴を反映しておらず、励起子に対するLOフォノンの影響については、未だ混沌とした状況である。そこで、われわれは、微細構造系(特に量子ドット系)での励起子とLOフォノンの相互作用の取り扱い方を確立し、この系での励起子に対するLOフォノンの影響を明らかにすることを目的とする。

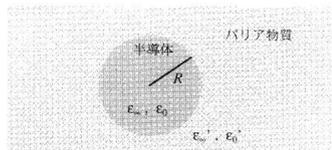


図1 半導体球形量子ドット

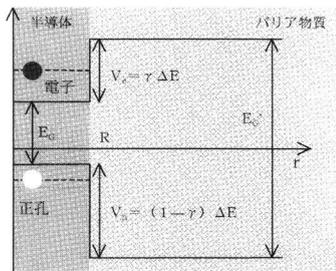


図2 閉じ込めポテンシャルの動径座標依存性

研究成果

本研究では、手始めに励起子基底状態(特に基底エネルギー)に対するLOフォノンの影響を議論する。最も簡単なモデルとして、図1のような単一球形量子ドットを考える。量子ドットを取り囲むバリア物質を非極性物質とした。量子ドットを構成する物質のバンドギャップをE\_g、バリア物質のバンドギャップをE\_g'、バンドオフセット比を $\gamma$ とし、電子及び正孔に対する閉じ込めポテンシャルを有限とした。閉じ込めポテンシャルの動径座標依存性を図2に示す。

励起子-LOフォノン相互作用を取り扱うためには電子-LOフォノン相互作用及び正孔-LOフォノン相互作用の断熱的な過程と非断熱的な過程の両方を考える必要がある。非断熱的な過程とは荷電粒子(電子または正孔)とLOフォノンが中間状態を介して相互作用する過程のことである。一方、断熱的な過程とは荷電粒子とLOフォノンが中間状態を介さず相互作用する過程のことで、その粒子に対するポテンシャルの井戸が生じることで、波動関数が変形し、エネルギー準位を下げる効果(静的ヤン・テラー効果)として知られる)がある。我々は、LOフォノンと相互作用している励起子の基底状態とそのエネルギーの計算において、励起子-LOフォノン相互作用の断熱的な側面と非断熱的な側面をうまく取り込んだ手法を確立し、その手法を用い球形量子ドット系での励起子に対するLOフォノン効果を議論した。また、電子及び正孔は固定せずに量子ドットの中で自由に動けるモデルを用いた。

典型的な例として図3にAlAs中のGaAs量子ドットの励起子基底エネルギー(a)及び励起子-LOフォノン相互作用エネルギー(b)のドット半径依存性を示す。図3(a)、(b)共に縦軸はバルクGaAsの励起子リユードベルグエネルギー( $Ry = 6.8 \text{ meV}$ )、横軸はバルクGaAsの励起子ボア半径( $a_B = 97.3 \text{ \AA}$ )を単位とした。図3(a)の点線はLOフォノンを無視した場合の励起子エネルギーである。量子閉じ込め効果による励起子エネルギーの高エネルギーシフトが確認できる。図3(b)より励起子-LOフォノン相互作用エネルギーはドット半径が減少するにつれ減少していることが分かる。このことは、電子と正孔のポーラロン効果が互いに打ち消し合うために断熱的な過程の寄与が減

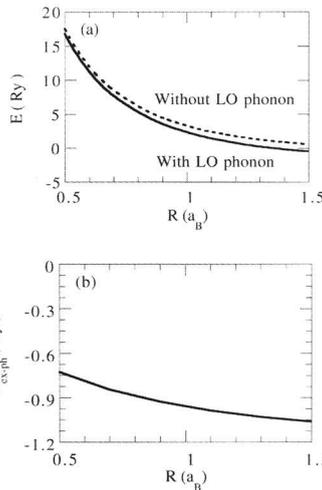


図3 AlAs中のGaAs量子ドットにおける励起子エネルギー(a)及び励起子-LOフォノン相互作用エネルギー(b);(a)実線は励起子-LOフォノン相互作用を考慮した場合、点線は励起子-LOフォノン相互作用を無視した場合。

少すること、閉じ込め効果によって状態間のエネルギー差が大きくなるために中間状態を介した非断熱過程の寄与が減少することに起因する。

産業技術への貢献

今回は、球形量子ドット中の励起子基底状態(基底エネルギー)に対するLOフォノンの寄与について議論し、量子ドット系での励起子-LOフォノン相互作用のドットサイズ依存性を明らかにした。今後、吸収係数などの物理量を計算し、LOフォノンの効果について具体的に議論することが、材料設計やデバイスの設計にとって重要である。また、励起子の内部励起状態に対するLOフォノンの寄与についての議論や、非線形光学効果に対するLOフォノンの効果についての議論も残された課題である。

研究発表

- 1) 大城和宣、赤井光治、松浦満: 量子ドット系における電子-LOフォノン相互作用-形状の効果; 日本物理学会日本物理学会2000年春の分科会講演概要集, p658, 2000.3.25.
- 2) 大城和宣、赤井光治、松浦満: 極性媒質に囲まれた超微粒子中の励起子に対するLOフォノンの効果; 日本物理学会日本物理学会第55回年次会講演概要集, p637, 2000.9.25.

連絡先

電話 0836-85-9622  
FAX 0836-85-9622  
E-mail: okazu@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp