

## 自己評価報告書

平成23年4月21日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20104009

研究課題名（和文）カーボンナノ構造における動的電子相関と光学応答

研究課題名（英文）Dynamical electronic correlation and optical response in carbon nanostructures

研究代表者

鈴木 秀勝（SUZUURA HIDEKATSU）

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10282683

研究分野：数物系科学，工学

科研費の分科・細目：物理学・物性I，応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：カーボンナノチューブ，励起子，光学応答，低次元電子系

## 1. 研究計画の概要

カーボンナノチューブ・グラフェンに代表される炭素原子の蜂の巣格子平面ネットワークにより構成されるカーボンナノ構造における電子は，通常の半導体とは異なり，質量ゼロのディラック方程式に従う特異な状態を形成している．電気伝導に関しては，非常に高い伝導率を示すなどの様々な特徴的振る舞いが知られており，光学応答においても他の物質には見られない特異性を示すと期待される．

実際，カーボンナノチューブの光学応答は，構造の擬次元を反映して，光励起により生成された電子と正孔の束縛状態である励起子に支配されるが，その束縛エネルギーは桁違いに大きく励起子は室温においても安定に存在する．束縛の強さは電気分極を増大させ，光との結合がより強固になることから，カーボンナノチューブは光による状態制御や新奇な光機能性につながる物性を持つ可能性を秘めている．

本研究の目的は，カーボンナノ構造における光励起状態における電子正孔間の相互作用に起因する動的電子相関効果を解明し，それが光学応答にどのように反映されるかを理論的に見出すことにある．具体的には，カーボンナノ構造の持つ特異な電子状態において実現する励起状態の電子正孔間相互作用を詳細に調べ上げる．様々な実験データと比較検討を重ね，励起子状態を記述する有効モデルを導出するとともに，光学応答に発現する動的電子相関を明らかにする．

さらに，低次元電子系一般に共通する光学応答の理解を推し進めるため，カーボンナノ

構造にとどまらず，半導体量子細線・量子井戸における相互作用の遮蔽効果や光強励起状態をも研究対象と捉え，最終的には，低次元電子系に普遍的な光学応答・光機能の解明に繋がる動的電子相関に関する学理の確立を目指す．

## 2. 研究の進捗状況

カーボンナノチューブの励起子光学応答を中心に研究を実施した．微小共振器中の半導体量子井戸の強励起発光スペクトルに対する研究も含め，主な成果を4つに分類し説明する．

（1）半導体カーボンナノチューブにおける励起子微細構造：電子状態の多谷構造による縮退を反映した複雑な励起子微細構造のチューブ構造に対する依存性を決定した．光励起状態からのエネルギー緩和により実現する発光の始状態が，唯一の光学活性を示す明励起子であれば，高強度発光が期待できることを想定し，明励起子が最低エネルギー状態となるチューブ構造を特定した．

（2）半導体カーボンナノチューブにおける励起子光学応答に対する不純物効果：不純物等の局所的な摂動による励起子微細構造と光吸収スペクトルの変化を計算した．準位混成により明励起子よりも低エネルギー側に存在する暗励起子の光学活性化を期待したが，その効果は微小であり，明励起子による光吸収は不純物の存在に対して安定である事が明らかになった．

(3) 多層カーボンナノチューブにおける層間遮蔽効果：多層構造を持つ場合、電荷移動が無くとも、異なる層に電気分極を誘起することにより、光と相互作用する層における電荷間の相互作用は遮蔽される。実際、層間遮蔽効果によりエネルギーギャップと励起子束縛エネルギーは共に強く抑制される事を明らかにした。それに対し、励起子エネルギー準位そのものは両者の効果が相殺し、微小な赤方遷移を示すにとどまった。

(4) ボーズ凝縮した微小共振器ポラリトンからの発光スペクトル：微小共振器中の半導体量子井戸の素励起である励起子ポラリトンを強励起し、ボーズ凝縮体が形成された場合の発光スペクトルを計算した。角度分解分光によれば、弱く相互作用するボーズ粒子系で実現する超流動状態からの発光には特徴的な分散構造が現れる事を見出した。超流動状態の実験的検証に役立つと期待される。

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

カーボンナノチューブの光励起状態において発現する電子正孔相互作用の示す多様な振る舞いについての理解が深まり、励起子構造を決定する理論模型が完成した。不純物などの局所ポテンシャルによる摂動効果や多層構造に起因した環境変化による影響の評価も可能となった。

また、カーボンナノ構造を含む、低次元電子系に普遍的な動的電子相関の解明を念頭に、半導体量子構造における光学応答の解析にも着手しており、微小共振器励起子ポラリトンの強励起発光に対する新たな知見を見出し、この方面の研究も順調に進展している。

### 4. 今後の研究の推進方策

カーボンナノチューブの励起子状態に対して構築した有効模型と光吸収に対するこれまでの成果を踏まえ、今後は、多様な光学過程に対する動的相関効果に着目して研究を推進する。基本的には当初の計画に従うが、具体的には、多方面に展開した研究の連続性を考慮し、まずは、チューブに垂直な偏光を持つ光に対する応答の反電場効果に対する多層構造の影響を評価する。また、構築した励起子有効模型を用いて発光スペクトルを計算し、強励起効果、電荷注入による遮蔽効果、電子格子相互作用の影響を明らかにする。

また、2次元系であるグラフェンと半導体

量子井戸における光学応答を計算する。グラフェンに特有な質量ゼロのディラック粒子の示す特徴を明らかにすると同時に、2次元電子系の有する普遍的な動的電子相関効果の解明を目指す。

### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Y. Tomio and H. Suzuura:  
“Impurity-induced valley mixing of excitons in semiconducting carbon nanotubes”, *Physica E42*, 783-786 (2010), (査読有) .
- ② T. Oshima, K. Matsuno and H. Suzuura:  
“Energy splitting between bright and dark excitons in carbon nanotubes”, *Physica E42*, 779-782 (2010), (査読有) .

[学会発表] (計16件)

- ① Y. Tomio and H. Suzuura:  
“Aharonov-Bohm effect on impurity-bound excitons in semiconducting carbon nanotubes”, *International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics 2011”*, International House of Japan, Tokyo, Japan, January 26–28 (2011), P2-21.
- ② Y. Tomio, H. Suzuura, and T. Ando:  
“Effects of inter-wall screening and anti-screening on excitons in double-walled carbon nanotubes”, *30th International Conference on the Physics of Semiconductors, COEX, Seoul, Korea, July 25-30 (2010)*, ThD1-5.
- ③ B.-Y. Lee and H. Suzuura:  
“Bogoliubov spectra in photoluminescence from a Bose-Einstein condensate in microcavity exciton-polaritons”, *30th International Conference on the Physics of Semiconductors, COEX, Seoul, Korea, July 25-30 (2010)*, P1-130.