

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2007～2011

課題番号：19101006

研究課題名(和文) カーボンナノチューブ量子ドットと電磁波の相互作用に関する研究

研究課題名(英文) Interaction between electromagnetic waves and carbon nanotube quantum dots

研究代表者

石橋 幸治 (Ishibashi Koji)

独立行政法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・主任研究員

研究者番号：30211048

研究代表者の専門分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：カーボンナノチューブ、量子ドット、量子閉じ込め、テラヘルツ、単電子トランジスタ

### 1. 研究計画の概要

本研究では、カーボンナノチューブ量子ドットと電磁波の相互作用を調べる。それにより、新たなメカニズムを持った超高感度・高機能電磁波検出器へ発展させることを目的としている。これまでの研究でわかってきた事実として、カーボンナノチューブ量子ドットの人工原子としてのエネルギースケールがミリ波からテラヘルツ帯にあることがある(0.1-10THz)。このことに着目して、開発が遅れている電波と光の中間に位置するテラヘルツ帯での新しい検出メカニズム研究の特に注目する。

### 2. 研究の進捗状況

#### (1) 量子的相互作用

カーボンナノチューブ量子ドットの人工原子としてのエネルギースケールがミリ波からテラヘルツ(THz)帯にあることがある(0.1-10THz)ことは、この周波数帯とカーボンナノチューブ量子ドットが量子的な相互作用をすることを強く示唆している。すなわち、テラヘルツ波を電波としてではなく光子として検出する可能性がある。実際、カーボンナノチューブ量子ドットに周波数の異なる電磁波を照射すると、THz光子の吸収による新たなクーロンピーク(サイドピーク)を見いだすことに世界ではじめて成功した。本成果は、量子ドットでTHz波を量子的に検出した(THz光アシストトンネル)世界初の成果である。

さらに、THz波とデバイスの結合を強くするため、ソースドレイン電極をアンテナ構造とするプロセスを開発している。アンテナ構造の作製のため、多量の電子線を照射することになるが、それが数マイクロン以上離れたカ

ーボンナノチューブにダメージを与えることを明らかにし、最適なデバイスプロセスを確立した。

#### (2) 電荷検出器としてのCNT単電子トランジスタ

単電子トランジスタは、究極の電荷検出器である。このことを積極的に利用して、全く新しい電荷検出メカニズムを見いだした。すなわち、GaAs/AlGaAs<sub>2</sub>次元電子ガス基板上にCNT単電子トランジスタを作製し、THz波を当てながら強磁場を印可した状態で、単電子トランジスタのクーロン振動の変化の様子を調べた。その結果、一定周波数のTHz波を印可している状態で、磁場の強さを変えてゆくと、クーロンピークのーがシフトしてゆく様子が見られた。周波数の異なるTHz波を印可した状態でも同様のピークシフトが見られた。しかも、ピークシフトは2次元電子ガスがサイクロトロン共鳴をする磁場で、最大となる。このことは、THz波により、CNT単電子トランジスタのしたのランダウ準位を形成している2次元電子ガスが励起され、電荷分布が変化し、それを単電子トランジスタが検出したとするメカニズムで説明することができる。これは、全く新しい検出メカニズムであり、超高感度であると期待される。

### 3. 現在までの達成度

#### ①当初の計画以上に進展している。

カーボンナノチューブ量子ドットの人工原子としてのエネルギースケールがテラヘルツ帯に着目したのは我々が世界初である。また、2次元電子系のランダウ準位や半導体の不純物準位がテラヘルツ帯にあることから、カーボンナノチューブ量子ドットとこれらの相互作用には様々な可能性がある。その一

端を世界ではじめて明らかにできたことは、想定外の結果ではあるが、その結果、今後の発展性がますます楽しみになっている研究である。

#### 4. 今後の研究の推進方策

様々な可能性が考えられるが、大きく分けて、これまでの2つの検出メカニズムをさらに発展させてゆく。

##### (1) 量子的相互作用

これまで量子的相互作用を実現したのは、単一量子ドットにおいてである。これを、2重結合量子ドットへ発展させる。単一ドットと2重ドットの最大の違いは、後者では量子遷移が閉じこめ準位間で起こるため、電極のフェルミ準位の熱的揺らぎの影響を受けないことである。このため、より高温で、量子応答をする可能性がある。2重ドット構造を作製するためのトップゲート構造を持ったデバイスプロセスの開発も同時に行う。

##### (2) 電荷検出器としての CNT 単電子トランジスタ

半導体の不純物準位が THz 領域にあることを利用して、不純物をドーピングした半導体上にカーボンナノチューブ量子ドットを作製し、通常光電流として検出されているメカニズムを、単電子トランジスタを用いた電荷検出型とする。これにより、超高感度が実現できるし、強磁場も必要としない点で、実用的にも有効な検出器となる。

#### 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5件)

1. Yukio Kawano, Takao Uchida, and Koji Ishibashi, (査読あり) "Terahertz sensing with a carbon nanotube/two-dimensional electron gas hybrid transistor", Appl. Phys. Lett. **95**, 083123 (2009)
2. Tomohiro Yamaguchi, Takeo Tsukamoto, Satoshi Moriyama, Masaki Suzuki and Koji Ishibashi; (査読あり) "Effect of Quantum Hall State of Substrate on Single-electron transport of Carbon Nanotube Quantum Dots", Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 015001(1-3) (2009)
3. K. Ishibashi, S. Moriyama, T. Fuse, Y. Kawano, S. Toyokawa, T. Yamaguchi, (査読あり) "Artificial atom and quantum terahertz response in carbon nanotube quantum dots", J. Phys: Condensed Matter, a special issue, **20**, 454205 (1-5), (2008)
4. Y. Kawano, T. Fuse, S. Toyokawa, T. Uchida, K. Ishibashi, (査読あり)

"Terahertz photon-assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots", J. Appl. Phys. **103**, 034307 (2008)

[学会発表] (計30件)

1. K. Ishibashi, A. Hida, H. Tabata (invited), "Quantum dots in carbon nanotube and their molecular scale nanostructures", International Symposium on Quantum Nanostructures and Spin-related Phenomena (QNSP2010), Tokyo, Japan, March 9-11, 2010
2. K. Ishibashi, A. Hida, H. Tabata, Y. Kawano and T. Yamaguchi (invited), "Carbon nanotube quantum dots and molecular scale nanostructures", International Workshop on Nanoscience and Nanotechnology, Frascati, Italy, Oct. 19-22, 2009
3. K. Ishibashi, A. Hida, H. Tabata, Y. Kawano and T. Yamaguchi (invited), "Carbon nanotube quantum dots and nanostructures", Frontiers in Nanoscale Science and Technology (FNST2009), Harvard University, Boston, USA, May 29-31, 2009
4. K. Ishibashi, S. Moriyama, T. Fuse, Y. Kawano, S. Toyokawa, S. Y. Huang, N. Fukata, and T. Yamaguchi (invited): "Quantum-dot devices with carbon nanotubes and Si nanowires", International Baltic Sea Region conference "Functional materials and nanotechnologies (FMNT08)", The conference is devoted to 30th anniversary of Institute of Solid State Physics, University of Latvia., Riga, Latvia, April, 1-4, 2008
5. K. Ishibashi (invited): "THz photon assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots", 8<sup>th</sup> Japan-Sweden QNANO workshop, Lund, Sweden, 13-14, December, 2007

[図書] (計1件)

石橋幸治:「ナノカーボンハンドブック」(遠藤守信/飯島澄男監修、エヌティーエス 2007年7月) 分担執筆(3章3節2項3. CNTによるナノデバイス 327-334)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: テラヘルツ光検出装置とその検出方法

発明者: 河野行雄、石橋幸治

権利者: 理化学研究所

種類: 特許

番号: 特願 2008-222980

出願年月日: 平成 20 年 9 月 1 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)