

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

Interaction between electromagnetic waves and carbon nanotube quantum dots

石橋 幸治 (Ishibashi Koji)

(独) 理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・主任研究員



研究の概要

カーボンナノチューブ量子ドットの1次元人工原子としてのエネルギーは、その微細性のために、先端リソグラフィーで作製される量子ドットに比べて1桁から2桁ほど大きく、周波数にして、テラヘルツの領域にある。このことを利用して、主としてテラヘルツ波との相互作用を調べ、新しい超高感度・高機能テラヘルツ検出器の基本原理を実証する。

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：マイクロ・ナノ科学・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、テラヘルツ、単電子トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

カーボンナノチューブ (CNT) は直径が 10nm 程度の超微細な円筒状の物質で、10 年ほど前に 1 本の電気伝導が測定されてからその電気伝導の研究が活発に行われている。このサイズは、先端リソグラフィーでは作製が困難なスケールであるため、超微細ナノデバイスの Building Block としても注目されている。

一方、テラヘルツ (THz) 帯の周波数には、環境や生体に関わる分子の振動周波数が存在するため、医療診断、検査、環境診断の観点から重要性が認識されているが、電波と光の中間にある周波数帯であるため、特に受信機において開発が遅れている。

2. 研究の目的

当該研究者は、カーボンナノチューブで作製した量子ドットを長く研究しており、人工原子としての性質をはじめ観測した。そこで、人工原子としてのスケールがテラヘルツ帯にあることに注目し、この周波数帯における新しい相互作用メカニズムの解明、そして新しい検出器への応用可能性への発送を得た。また、人工原子的な性質は、スピン型の量子コンピューティングデバイスの観点からも魅力的であり、そのためには、スピンのゼーマン分裂エネルギーに対応するマイクロ波との相互作用を調べる必要がある。同時に、これらを実現するために必要な、単一・2重結合量子ドットなどをカーボンナノチューブで作製するためのデバイス作製技術の

開発を行う。

3. 研究の方法

カーボンナノチューブデバイス研究の鍵は、信頼性・再現性あるデバイスプロセスの実現にあると言っても過言ではない。本研究では、これまでの研究を元にして、成長法がナノチューブの品質に重要な役割を果たすと考え、品質のよいと考えられるレーザーアブレーション法を用いたナノチューブを溶液から散布する方法に加え、比較的高温で成長が起るメタンガスを用いた気相化学成長 (CVD) 法を併用して、単一および2重結合量子ドットを作製し、その直流電磁波応答特性を、周波数帯によって、ミリケルビン (マイクロ波) から液体ヘリウムの数ケルビン (THz 波) 間で調べる。

4. これまでの成果

カーボンナノチューブ量子ドットの作製技術に関して、レーザーアブレーション法のみならず、メタン CVD でも人工原始的振る舞いを観測することができた。以下に、これまでの主たる成果を報告する。

(1) THz 波に対する量子応答の観測
1 電子帯電エネルギー (E_c) が THz 周波数より大きな単一量子ドットでは、照射した THz 電磁波を光子として吸収し、新しい電流経路を生み出す光アシストトンネル (PAT) が期待できる。

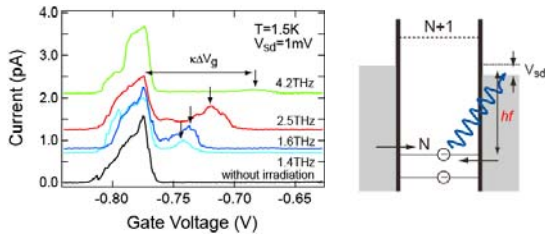


図1：THz 波照射によるクーロン振動の変化（左）と THz-PAT のメカニズム

図1(a)は、 E_c が 25meV (~ 6 THz) 程度ある単一量子ドットに外部から周波数の異なる THz 波を照射したときのクーロン振動ピークの変化の様子である。THz 波を照射していない時にあらわれるクーロンピーク（メインピーク）の右側にあらわれる新たなピークは、量子ドット中の電子が THz 光子を吸収してドレイン電極へトンネルする THz-PAT に起因している（図1(c)）。その結果、メインピークからサテライトピークまでの電圧差は、周波数に比例している。このような THz 帯での PAT を量子ドットで観測したのは本研究が初めてである。

(2) 高感度エレクトロメータとしてのカーボンナノチューブ量子ドット

GaAs/AlGaAs 次元電子ガス上に作製した CNT 単電子トランジスタ (SET) に一定周波数の THz 波を照射し、印可する磁場の大きさを変えながら、クーロン振動ピークの変化の様子を調べた。その結果、図2に示すようにクーロン振動ピークは磁場の強さを強くしてゆくとともにシフトするが、サイクロトロン共鳴を起こす磁場でシフト量が最大となることがわかった。このことは、磁場の印可により高移動度 2 次元電子ガスにランダウ準

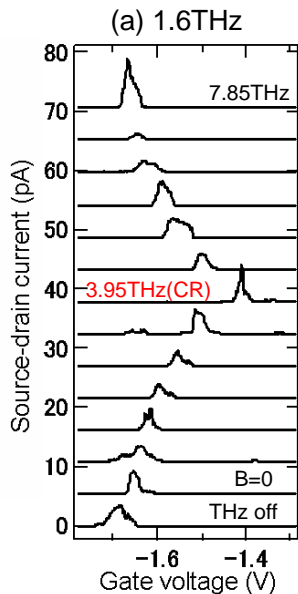


図2：一定の周波数の THz を照射し、磁場を強くしていったときのクーロン振動ピークのシフト

位が形成され、サイクロトロン共鳴を満足すると、ランダウ準位間の遷移が共鳴的に増加する。これにより、CNT-SET 直下の 2 次元電子ガスの電荷分布が変化し、それを、高感度電荷計である CNT-SET 画読み取っていると考えられる。このようなメカニズムは、1 電子の計測を行っていることから、現在使われている光伝導型の検出器に比べて格段に高感度であるといえる。

5. 今後の計画

THz 応答においては、これまでにない 2 つの応答メカニズムを見いだした。いずれも、現在使われている検出器の動作原理とは全く異なるものである。究極の性能を出すには、2 重結合量子ドットで、(1) と (2) のメカニズムを融合させることである。これにより、室温動作、超高感度、分光機能のすべての要件を満たすことが期待される。そのために、2 重結合量子ドットを作製するプロセスの開発も進める。

6. これまでの発表論文等

Yukio Kawano, Takao Uchida, and Koji Ishibashi, "Terahertz sensing with a carbon nanotube/two-dimensional electron gas hybrid transistor", Appl. Phys. Lett. **95**, 083123 (2009), selected for the September 14, 2009 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology

K. Ishibashi, S. Moriyama, T. Fuse, Y. Kawano, S. Toyokawa, T. Yamaguchi, "Artificial atom and quantum terahertz response in carbon nanotube quantum dots", J. Phys: Condensed Matter, a special issue, **20**, 454205 (1-5), (2008)

Y. Kawano, T. Fuse, S. Toyokawa, T. Uchida, K. Ishibashi, "Terahertz photon-assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots", J. Appl. Phys. **103**, 034307 (2008), selected for Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology, February 25, 2008, Volume 17, Issue 8

S. Moriyama, T. Fuse, T. Yamaguchi, and K. Ishibashi: "Spin effects in single-electron transport through carbon nanotube quantum dots", Phys. Rev. **B76**, 045102 (2007), selected for the July 23, 2007 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science and Technology

河野行雄、豊川聖子、布施智子、内田剛夫、石橋幸治：講演奨励賞受賞記念講演「カーボンナノチューブ量子ドットを用いた周波数可変テラヘルツ光子センシング」、平成 19 年秋期第 68 回応用物理学会学術講演会ホームページ等

http://www.riken.jp/lab-www/adv_device/index.html