

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの研究

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

石橋 幸治 ((独)理化学研究所石橋極微デバイス研究室 主任研究員)

主たる共同研究者

本間 芳和 (東京理科大学理学部 教授)(~平成15年3月)

安井 孝成 (長岡技術科学大学工学部機械系 准教授)

尾上 順 (東京工業大学原子炉工学研究科 准教授)(~平成19年3月)

3. 研究内容及び成果

本研究は、新機能ナノデバイスの基本構造として量子ドットに注目し、カーボンナノチューブ(CNT)を用いたデバイス機能の実証およびデバイスプロセスの開発を目指している。研究グループは、(1)デバイスプロセス(石橋)グループ、(2)配線プロセス(本間)グループ、(3)ナノ触媒(安井)グループ、(4)フラーレン重合(尾上)グループ、で構成されたが、本間グループは平成15年度に同じ領域の別の課題として採択され、このチームから離脱した。

(1)CNT人工原子

CNTの量子ドットの離散準位の観測、電子殻構造の観測、ゼーマン分裂の観測、2電子間相互作用など、世界で初めて明確な人工原子の振る舞いの直接観測に成功し、スピン型量子ビット素子としての可能性を示した。

カーボンナノチューブ量子ドット(人工原子)は1次元箱形ポテンシャルに閉じこめられた電子系であり、カーボンナノチューブのバンドがフェルミ準位付近に2つあることとスピンの2重縮退を考慮すると、カーボンナノチューブの電子殻は4個の電子で閉殻することが予想される。このことを極低温(100mK以下)での単電子輸送を調べることにより明らかにした。すなわち人工原子で観測されるクーロン振動から得られる1電子帯電エネルギーが4電子周期や2電子周期を持つことを観測した。後者は、バンドの縮退が解けた場合に現れる。大きなソースドレイン電圧でクーロン振動ピークを測定することにより電子殻に電子が1個ある場合と2個ある場合のエネルギースペクトルを測定することに世界で初めて成功した。その結果、電子数が1個の場合には1電子準位のゼーマン分裂が観測されたのに対し、電子数が2個の場合にはエネルギースペクトルは相互作用する2電子系に特有のスピン1重項状態と3重項状態であることを直接観測した。これらの結果は、電子殻に電子を1個入れた場合には単一スピンの形成されていることを示しており、これはスピン型量子ビットが形成されていることに他ならない。また、2電子状態は2電子のエンタングル状態が形成されていることに対応しており、いずれもカーボンナノチューブ人工原子では量子情報処理デバイスにとって重要な特性を得ることが容易であることを示している。

(2)テラヘルツ検出

CNT人工原子で超高感度テラヘルツ検出が可能であることを世界で初めて示した。

カーボンナノチューブ人工原子の特徴の一つは、人工原子としてのエネルギースケールがサブミリ波からテラヘルツ波の領域にあり、カーボンナノチューブ人工原子がテラヘルツ波に対して量子的に(光子として)応答すると考え、カーボンナノチューブ人工原子に1.5Kにおいて様々な周波数のテラヘルツ波を照射することによって、量子ドットからドレイン電極への光アシストトンネルによる電流ピークを観測することに成功した。この光サイドバンドによる電流ピークの位置は周波数に対して直線的に移動することから、このピークが光アシストトンネルに

起因していることを明らかにした。また、光アシストトンネル電流ピークがテラヘルツ波の強度に対してベッセル関数的に変化することも観測しており、これらの結果からテラヘルツ波が量子ドットによって量子的に検出されていることを見出した。量子ドットのテラヘルツ波に対する量子応答の観測は世界で初めての成果である。

(3)単電子デバイス

イオンビームを多層カーボンナノチューブに局所的に照射して形成したトンネル障壁を用いて単電子トランジスタを2個直列に形成した CMOS 型単電子インバータをカーボンナノチューブで実現することに世界で初めて成功した。このデバイスは単電子トランジスタを1本のナノチューブに集積した点、カーボンナノチューブで初めて量子ナノデバイスを作製したという点で意義の深い成果である。単層カーボンナノチューブの両端に電極を形成すると量子ドットが形成できることを利用して、同様の単電子インバータを作製することにも成功した。また、周期的なゲート特性を有する単電子トランジスタの特性を利用することにより、単層カーボンナノチューブを用いて単電子 XOR(排他的論理和演算)デバイスを実現した。

(4)CNTとGaAs/AlGaAs構造

CNTとGaAs/AlGaAsのハイブリッド化を初めて提案し、新しいデバイス応用の可能性を示した。

GaAs/AlGaAs2次元電子ガス(2DEG)基板上にホールバーをメサエッチングにより作製し、量子ポイントコンタクトゲートとカーボンナノチューブ単電子トランジスタを作製し、2次元電子ガスをゲートとして単電子トランジスタを動作させることに成功した。

(5)単層カーボンナノチューブの高真空低温成長

一般にナノチューブの成長は700度程度以上の高温で行われる。このことは、将来の半導体デバイスとの融合を考えた場合にプロセス上問題となる。新しいカーボンナノチューブの成長法として、従来のアルコールを用いたCVD法の成長圧力よりも2桁から3桁低い圧力条件で成長する技術の開発を行った。その結果、成長速度は遅くなるものの、単層カーボンナノチューブの成長に成功し、ラマン散乱で評価した最適条件を与える成長温度が通常のCVDに比べて200~300 下げることが出来ることを見出した。

(6)ナインデント法によるCNTの選択成長

インデント(局所的な圧力加工)法を用いて、Co/Si基板上のインデント領域のみにCNTを選択的に成長するプロセスを開発した。顕微ラマン分光の結果、孤立した単層のCNTがインデント内部に選択成長でき、面内均一性も良好であり、基板上の任意の位置にCNTの選択成長できる可能性を示した。

(7)フラーレン電子線重合

C₆₀フラーレン薄膜に加速電圧3kVの電子線を照射すると、フラーレン分子同士が融合反応し、ピーナッツ型構造をもつ新しいナノカーボンポリマーが生成していることを赤外振動分光および理論解析により見いだした。また、振動分光の結果、グラファイトやナノチューブに対応する振動ピークは観測されなかった。このピーナッツ型ナノカーボンポリマーを室温・大気下で四端子測定した結果、電流 電圧特性がオーミック特性をもつことから、ピーナッツ型ナノカーボンが導電性を示す物質であることを発見した。

4. 事後評価結果

4 - 1 . 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

原著論文		招待講演		通常講演		ホスター発表		その他		特許出願	
国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内	国際	国内
55	0	30	42	15	75	38	10	1	9	0	4

基礎研究的には十分な歩留でCNTデバイス製造プロセス技術を高め、単電子素子の基本特性やインバータやXOR回路の動作実証を実現しそれらの問題点を明らかにすると共に、明確なCNTの人工原子的振る舞いの直接観測に成功したこと、量子ドットのテラヘルツ波に対する量子応答を観測したことなど、世界初の優れた成果を出している。

論文、学会発表は、質、量ともに優れている。特に、国際、国内学会での招待講演の多さや影響力の高いwebページで紹介されたことは研究の質の高さと国際的に評価されていることを物語っている。特許出願が少ないのは、基礎研究のフェーズのためやむを得ない点はあるが、今後の出願を期待する。

4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

CNT人工原子やスピン型量子ビットなどCNTで形成した量子ドットの電子物性の解明を世界に先駆けて行ったことは興味深く、大きな科学的インパクトを与えた。CNTで海外ではこのような成果は全くなく、CNTを使った面白い物理の発見となっており、CNTが量子化機能材料として極めて筋の良い素材であることを種々の物性測定から実証した。また、単電子インバータ、単電子論理演算デバイス、テラヘルツ波検出器など、今後のCNT応用デバイスの可能性を示すものとして科学的インパクトが大きい。現在はテラヘルツ領域の検出器の開発が遅れており、天文学分野の研究者達がCNTテラヘルツ波検出器に大きな興味を示している。

4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

- ・CNT単電子トランジスタを用いたCNT量子ドットの特性解析と、そのテラヘルツ光検出への応用の研究は、予想外の展開となったが、大きな量子電子物性研究における研究成果を創出した。
- ・本研究による、単電子インバータ、CNT人工原子、テラヘルツ検出器などの成果が一般紙を含めて19の新聞に掲載され、社会に対する情報発信に寄与した。
- ・領域を越えたCNTに関するワークショップを3回主催し、ノウハウや情報の交換に努力し、これらのメンバーを中心にCRESTに続く平成19年度からの特定領域研究「カーボンナノチューブナノエレクトロニクス」に繋げ、カーボンナノチューブのデバイス研究の基礎を築いたという点で意義深い。
- ・本研究の成果が元になって、次の2つの文部科学省科学技術補助金制度へつなげた。
 - 基盤研究(5)「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」
研究代表者:石橋幸治 平成19年度～23年度
 - 特定領域研究「カーボンナノチューブナノエレクトロニクス」(領域代表:水谷孝名古屋大学教授)計画研究「機能性カーボンナノチューブを用いた量子ナノデバイスの開発」
研究代表者:石橋幸治 平成19年度～23年度
- ・受賞
 - 応用物理学会「講演奨励賞」など国内4件。