

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610049

研究課題名(和文)量子ドット人工原子による電波・赤外分光天文観測の為に次世代超高感度検出素子の開発

研究課題名(英文) Developments of High sensitive Quantum Dot Detectors for Radio and Infrared Astronomy

研究代表者

前澤 裕之 (Maezawa, Hiroyuki)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00377780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、ブラックホールや、生命起源物質、系内外惑星大気の観測的研究において、より微弱な電波～光赤外域の分光観測の重要性が高まっている。そこで、カーボンナノチューブを用いた量子ドットによる極限的な高感度検出素子の製作に着手した。また、素子にフェムトアンペアのレベルで低雑音に電流・電圧を供給する極低温機械式冷却システムを完成させた。さらに2重接合の量子ドット素子のモデルを開発し、クーロンブロックードやクーロンステアケース、光アシステッドトンネリング現象に付随する非線形電圧電流特性のシミュレーションを可能にした。これにより、回路設計や、動作点の最適化、プロセスへのフィードバックが容易化した。

研究成果の概要(英文)：Currently, in astronomical research fields of distant galaxy, black hole, atmospheres of planets in solar system and exoplanets, and astrobiology, there is a constant increase in demand of highly sensitive observations of weak spectral lines. We started developing novel, highly sensitive quantum-dot detectors employing carbon nanotube (CNT-QD) in radio to infrared/visible bands and a spectroscopic receiver system using these detectors. In this study, new CNT-QDs with improved fabrication processes are integrated into two-dimensional quasi-optical antennae. The model for the study of nonlinear current-voltage characteristics of the CNT-QD induced by Coulomb blockade, Coulomb staircase, and Photon-assisted tunneling effects was also developed. This numerical simulation is useful for designing RF and IF impedance matchings for CNT-QD circuits, physical properties of the CNT-QD, fabrication processes, and optimization of operational conditions.

研究分野：電波天文学 地球・惑星科学

キーワード：量子ドット テラヘルツ波 電波天文学 赤外天文学 カーボンナノチューブ リモートセンシング
ヘテロダイナミック分光

1. 研究開始当初の背景

ミリ波/サブミリ波帯の電波天文学や惑星大気の分光リモートセンシングでは、超伝導電極/絶縁層/超伝導電極(SIS)の接合部における光アシストトンネリング(PAT)による非線形現象を利用した高感度検出素子が威力を発揮してきた。さらに周波数の高いテラヘルツ(THz)帯では、超伝導クーパー電子対の破壊が生じ、SIS 検出素子は動作不能となる。そこで、THz 帯では超伝導細線を集積したホットエレクトロンボロメータ(HEB)ミキサ素子が実用化されつつある。これらのヘテロダイン検出器や、現存する赤外域の高感度熱型・量子型検出器の感度は、指標の一つである等価雑音パワー(NEP)として $10^{-18} \sim 20 \text{ W/Hz}^{1/2}$ 程度が得られている。

近年、生命起源物質のサーベイや、系内外の惑星大気やハビタブルゾーン、遠方銀河、ブラックホールシャドウなどからの極めて微弱な電波・光・赤外域の分光観測の重要性が急速に高まっている。このため、これらの波長域において、より超高感度な検出素子の開拓が求められている。

2. 研究の目的

本研究は、理化学研究所との分野横断のユニークな共同開発により、電波・赤外領域において究極の感度をもつと期待される量子ドット(QD)検出素子を応用し、天文学の分光観測や直接撮像のための極限的な高感度検出器を創出することを目的としている。現在、電波天文学で威力を発揮している SIS、HEB、MKIDS、TES といった検出素子も、製作プロセスや高感度化設計の手法が完全に結実するまでに 10-15 年の歳月を要している。量子ドット素子について、天文観測への応用・実用化へ向けて、今から基礎実験の先鞭をつけることが本研究の鍵となる。

QD 素子では、接合容量の小さい微小ドット接合の障壁でのトンネリング/クーロンブロックードにより非線形電流-電圧特性が現れる。この状態にマイクロ波から赤外領域に渡る電磁波を照射して PAT を誘起し、ヘテロダイン・フォトンカウンティング検出素子としての動作・感度の基本性能の検証を目指す。そのための評価環境を構築・確立する。

3. 研究の方法

カーボンナノチューブを用いた量子ドット(CNT-QD)では、接合容量を微細化できるため、クーロン障壁を大きく設計でき、素子は THz 帯のエネルギー準位をもつ人工原子のように光応答が可能となる。CNT-QD 素子を我々のサブミリ・THz 帯の天文観測用受信機に搭載できるように、素子のインピーダンス整合やビーム集光アンテナ、サイドゲート電極などの最適化設計を行う。また、CNT-QD のミリ波~THz 帯でのヘテロダイン検出素子・フォトンカウンティング素子としての性能評価・実用化開発の環境を整備する。さらに、CNT-QD の電磁波との相互作用の物理素過程を探り、回路全体を含めた検出素子としての動作メカニズムのモデル化を行い、これを高感度化開発にフィードバックするスキームを確立する。

4. 研究成果

(1)

2K まで冷却可能な機械式冷凍機に搭載した冷却光学系 + SIS/HEB 受信機システムに、CNT-QD 素子を実装できるように設計改良を行った。また、Source/Gate/Drain に微小電流を供給するシステムを実装した(Fig.1)。特に、QD 素子は外部の電磁環境の影響を受けやすいため、各ポートの電圧・電流のゆらぎやオフセットなどを極限まで低減し、フェムトアンペアのレベルまでノイズレスにオペレーションできるシステムを構築した。

また、CNT-QD 素子の感度評価に際しては、常温黒体、液体窒素による冷却黒体の温度差を利用した通常の hot/cold の手法では、素子の応答がサチュレーションするため、低温領域において温度可変の冷却黒体を開発・実装した。またそのための光学伝送系の設計を GRASP ソフトウェアを用いて行った(Fig.2)。



Fig.1 : 開発した CNT-QD 冷却性能評価システム。従来の冷却受信機/分光計測システムに超低雑音電流電圧システムや温度可変の冷却黒体チャンバーを実装している。

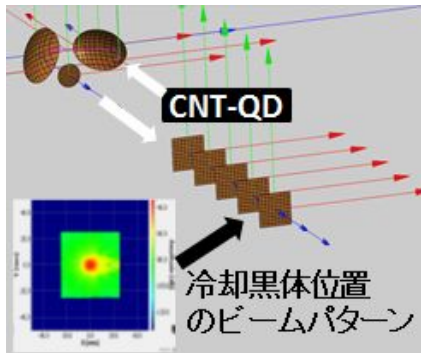


Fig.2: CNT-QD から温度可変の冷却黒体までの伝送光学系。

(2)

CNT-QD 素子の実用化では、設計したパラメータ(抵抗、容量)で微小ドット接合部を再現良く形成できるかが重要な開発要素となる。特に1つのウエハチップ内に一度に形成できる素子数が限られるため、接合には高い歩留り・再現性が求められる。

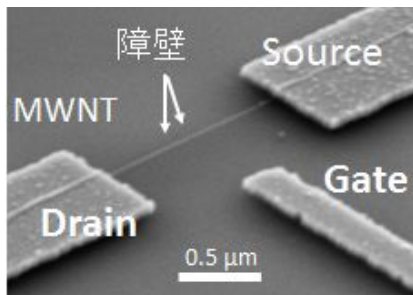


Fig.3 : 試作された CNT-QD の心臓部の電子顕微鏡画像。ドレインとソースの電極間にカーボンナノチューブが架橋されている。カーボンナノチューブの中央部に新しい手法で障壁が形成されている。

そこで、従来のエッチングの手法から、新しい独自の接合形成の手法を開発することにより、接合抵抗・容量の歩留り・再現性が改善された。また、この新しい接合形成手法を採用し、実際に素子を極低温まで冷却し、ソースとドレイン電極間の非線形電圧-電流特性や、ゲート電圧軸(サイドゲート方式を採用)に対して周期的に並ぶ菱形のクーロンダイヤモンド特性(クーロンブロック現象により、電子がドット内に閉じ込められて移動できない状態)が得られることを確認した(Fig.4)。

現在、この電極/カーボンナノチューブ

の細線による心臓部を、レンズによる準光学型集光方式のツインスロットアンテナに集積し、検出素子の試作を進めている。

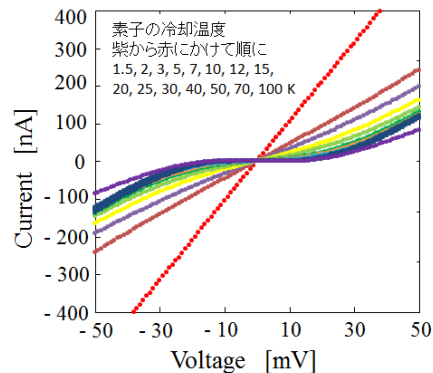


Fig.4 : ドレインとソースの電極間の電圧・電流特性の温度依存性。低温時に非線形特性を示している。

素子の集光部/フィードポイントにはサイドゲートが集積されるため、通常のツインスロットアンテナと比べてビームが H/E 面に対してわずかに非対称となる。この非対称性を低減するため、高周波電磁界シミュレータの HFSS と SINGULA を用いて、ドレイン/ソース/ゲートの配置を最適化してビームパターン(対称性、サイドローブ)を整形した。また伝送系において冷却黒体の位置にビームウエストが来る設計とし、GRASP を用いて、冷却黒体の位置で充分許容(>99%)の範囲のビーム効率を得られるようにした(Fig.2)。

製作した素子は、上記冷却システムに搭載し、ミリ-THz 波、光・赤外のヘテロダイン検出器・フォトン検出器としての性能評価(感度、IF 帯域、安定性/アラン分散評価、ダイナミックレンジ)を実施する予定である。

(3)

CNT-QD 検出素子としての高感度化設計のため、素子のモデル開発とこれを用いたシミュレーションを行った。このモデルは、2つの接合部をトンネリングする電子の輸送や、電子同士の散乱などに伴う電極間の相互作用による電子状態、インダクタンスなどの外部インピーダンスを考慮した回路全体に付随する電磁場環境の作用、量子ドット内の電子状態、などをハミルトニアンにより記述し、電極間のエネ

ルギー状態の差から電子の流れを数値計算により自己無頓着に求めるものである。

これによりクーロンブロックやクーロンステアケース、入射信号(RF)/局部発振信号(LO)による PAT 効果、冷却温度、などに依存する非線形電圧-電流特性のシミュレーションが可能となった(Fig.5)。このため、RF/LO とのマッチングの回路設計や、稼働時のバイアス動作点、量子ドット接合部の物理パラメータの最適化設計が容易化した。また実験結果を製作プロセスにフィードバックし易くなると期待される。

CNT-QD 素子は、従来の SIS や HEB などのヘテロダイン検出素子と比べて、PAT 状態の形成に際して、LO に求められる照射パワーを桁で低減できることも特徴の1つである。THz 帯では小型で安定かつ大出力のコヒーレント(10^9 の桁での周波数精度)な局部発振信号源の開発/確保が難しく、その意味でも CNT-QD 素子の有効性が発揮されると期待される。LO によって誘起されるショットノイズ等に起因する素子の等価雑音温の軽減は、トンネリングレートにより決まる IF 帯域/応答速度とトレードオフの関係にあるため、今後、本シミュレーションにより、これらの最適解も導出していく計画である。

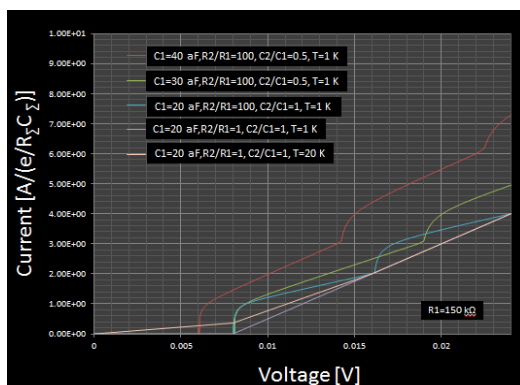


Fig.4: ドレイン/ソース電極間の電圧-電流特性の数値シミュレーション。CNT-QD の接合部のパラメータや温度に依存する電圧-電流特性から、素子の RF/IF インピーダンスの最適化設計や、動作ポイントの最適化などが可能。

5. 主な発表論文等

(学会発表)(計 1 件)

「人口原子量子ドット素子によるヘテロダイン/フォトン検出素子の開発」、齊藤滉介、西田侑

治、前澤裕之、石橋幸治、山口智弘、
日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京(東京都八王子市)、2016 年 3 月 17 日

6. 研究組織

(1)研究代表者

前澤 裕之 (MAEZAWA, Hiroyuki)
大阪府立大学・理学系研究科・准教授
研究者番号: 00377780

(2)研究分担者

(3)連携研究者

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