

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740248

研究課題名(和文)人工原子クラスターにおけるスピン状態の研究

研究課題名(英文) Spin states in multiply coupled artificial atoms

研究代表者

天羽 真一 (Amaha, Shinichi)

独立行政法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：90587924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：量子ドットを人工原子とみなし、より多くの人工原子(量子ドット)を配列することによって、新規なスピン相関や電気伝導特性を見出すことを目的とし、(1) 3重量子ドットにおいて、共鳴混成体を実現し、Pauliの排他率によって、tripletに比べ、singletが強く安定している様子を確認、(2) 多軌道を持つ2重量子ドットの3電子が寄与するスピンプロケイドを確認、(3) 3重量子ドットにおいて、2電子・3電子のスピンプロケイドの確認した。

研究成果の概要(英文)：The target of this project is to explore spin-related and electron correlated physics in transport properties of multiply coupled quantum dots. We have investigated (1) Resonance-hybrid states formed in two- and three-electron laterally coupled triple vertical quantum dot, (2) Three-electron spin blockade in a double quantum dot and (3) Two and three-electron spin blockades in series coupled triple quantum dot device.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、物性

キーワード：量子ドット

1. 研究開始当初の背景

資源の乏しい我が国において、また、今後の人類の発展において、希少元素の問題は避けて通ることのできない問題である。これまで、希少元素の有効活用、そのための実用材料設計、代替希少元素の探求という切り口で研究が進められてきた。しかし、有機磁性のように、希少金属で見られる磁性のような特徴も、ありふれた原子を配列し、その配列の自由度によって実現しようとする試みもある。

一方で、微細加工技術によって量子細線、量子ドットが実現され、電子1個の単位で制御、検出することが可能になっている。特に、量子ドットは殻構造やフント則といった原子と同様の性質を示すことから、人工原子と呼ばれている。さらに、人工原子を二つ並べて形成される2重量子ドットは、人工分子とみなすことができ、結合軌道・反結合軌道の生成、共有結合やイオン結合状態、Heitler-London 状態が実現していることが明らかにされていた。

2. 研究の目的

本研究課題においては、量子ドットを人工原子とみなし、より多くの人工原子(量子ドット)配列することによって、人工原子クラスターを構成し、配列の自由度を生かして、天然にある分子と同様に期待される多彩な物性や、多数、人工原子を配列することによって現れる特徴的なスピン配列を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

電子を閉じ込めるポテンシャルの回転対称性を制御しやすい縦型量子ドットを用いて、多重量子ドットを構成する。具体的には、(1)ピラーを横に複数並べることで構成される並列結合型、(2)ピラー内に複数の量子井戸を設けることで構成される直列結合型の、2つの構成手法を用いて、多重量子ドットを作製する。作製された多重量子ドットの極低温での電気伝導を調べる。励起スペクトロスコピーや、クーロンブロックイド、スピンプロケイドなどの特徴を評価し、理論することで、電子状態・スピン状態を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 並列3重量子ドットにおける共鳴混成体とスピン状態

自然界に見られる分子では、電子は分子内に拡がって共鳴混成体(Resonance hybrid)を形成し、安定化することが知られている。今回、我々は、人工原子を3つ配列することで、人工的な共鳴混成体を実現し、安定性を調べることに成功した。我々が用いた試料は、並列に3つのピラー、すなわち、縦型量子ドットを並べることで作製され、いわゆる、3重量子ドットになっている。作製した3重量子ドットを用い、実験で得られた励起スペクトル

と理論結果を比較した。3重ドットに閉じ込められた2電子状態では共鳴混成体を形成して安定化していること、2電子状態ではsingletに比べて、スピンの揃ったtriplet状態が、Pauliの排他律による2重占有の禁止によって不安定になっていること、3電子状態でも共鳴混成体が生じ、電子による位相に起因した特徴ある結合ができていることを解明した。

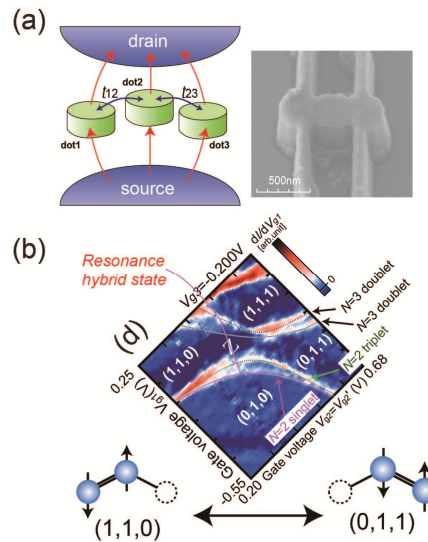


図1 (a) 並列3重量子ドットの模式図(左)と試料のSEM写真。(b) 3重量子ドット2電子で確認された共鳴混成体の形成。図中央に示した励起スペクトロスコピーで、 $(N_1, N_2, N_3)=(1,1,0)$ $(0,1,1)$ (N_1, N_2, N_3 は、それぞれの量子ドットの電子数)の共鳴が生じ、singletの方がtripletよりも強く安定化している様子が確認された(S. Amaha et al., Phys. Rev. B, **85**, 081301 (2012))。

(2) 3軌道を内包する直列2重量子ドットにおける3電子スピンプロケイド

3重障壁構造(2重量子井戸構造)を内包する半導体基板をピラー状に微細加工することによって構成される2重量子ドットの電気伝導特性を調べた。これまでの2重量子ドットでは、2つの量子ドットの電子数の和が偶数のときに、Pauliの排他率に起因して、同時占有が禁制となるため、電気伝導が抑制されるPauli spin blockadeが報告されていた。今回、我々は2重量子ドットの電子数がちょうど3となる場合であっても、Pauliの排他率に起因した電流抑制が生じることを確認した。具体的には、 $(N_1, N_2)=(1,2) \rightarrow (0,3)$ (N_1, N_2 は、2重量子ドットを構成する2つの量子ドットの電子数)の電荷移動が期待される領域で、電気伝導の抑制を確認した。電気伝導が抑制された領域は、クーロンダイヤモンドから少し離れた領域に存在するという特徴を持っていた。3電子が寄与することから、1つの量子ドット内で2つの軌道が寄与していることが期待されたため、2つの軌道を仮定し、クーロンダイヤモンドの数値計算を行って、電気伝導が抑制される領域が理論的に再現できることを確認した。

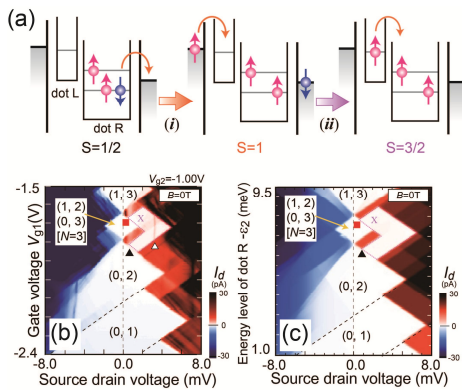


図2 (a) 直列2重量子ドットの3電子のスピンロッキングの模式図。S=1(triplet)を介して、S=3/2の状態に入ると、電流が抑制される。(b) 測定で得られたクーロンダイヤモンド。“X”の領域で、電気伝導が抑制されていることが確認できる。Xでは、(a)のプロセスが可能となるため、電流が抑制される。(c) 対応する理論計算の結果。Xの領域での電流抑制が再現されている(S. Amaha et al., Phys. Rev. B **89**, 085302 (2014))。

(3) 直列3重量子ドットにおけるスピンロッキング

4重障壁構造(3重井戸構造)を持つヘテロ構造をピラー状に切り出すことによって、縦型直列3重量子ドットを実現した。古典的な電荷モデルを用いた計算結果と、実験で得られたクーロンロッキング領域との比較を行い、各量子ドット内の電荷状態を同定した。co-tunneling過程を含む電子数2でのPauliの排他率による2電子スピンロッキングを確認するとともに、(2)と同様に、3電子が寄与するスピンロッキングによるものを期待される直列3重量子ドットでの電気伝導の抑制を確認した。

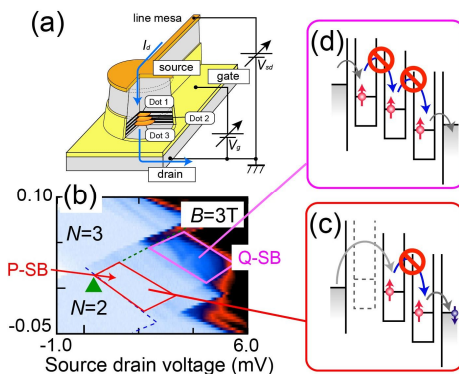


図3 (a) 直列3重量子ドットの模式図。3つの量子井戸を内包する半導体基板を微細加工することによって、直列3重量子ドットを構成する。(b) 極低温下、電流と直交する向きの磁場3Tでの電気伝導の測定結果(クーロンダイヤモンド)。P-SB、Q-SBと書かれた領域で、電流抑制が見られる。(c)、(d) P-SB領域、Q-SB領域で、電流抑制に寄与すると考えられる電気伝導の模式図。(c)では、2電子、(d)では3電子が寄与し、どちらも、Pauliの排他率によって、同時占有が禁制となるため、電流が抑制される(S. Amaha et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 016803 (2013))。

(4) 環状構造を持つ4重量子ドットの作製
3重障壁構造を持つヘテロ構造を2つのピラーが並列に並ぶように加工し、ゲート電極を付けることで、直列2重量子ドットが、並列に2つ並ぶ、すなわち、環状に4つの量子ドットが結合する4重量子ドットの作製を行った。ゲート電圧を振ることで、Stability diagramを取ることができ、クーロン振動列の反交差や電子数が0になっていると思われるクーロンロッキング領域の確認を行うことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Tarucha, K. Kono, and K. Ono, “Spin blockade in a double quantum dot containing three electrons”, Phys. Rev. B **89**, 085302 (2014). DOI:10.1103/PhysRevB.89.085302

T. Hatano, Y. Tokura, S. Amaha, T. Kubo, S. Teraoka, S. Tarucha, “Excitation Spectroscopy of few-electron states in artificial diatomic molecules”, Phys. Rev. B. **87**, 241414(R) (2013). DOI:10.1103/PhysRevB.87.241414

S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Teraoka, S. Tarucha, J. A. Gupta, and D. G. Austing, “Two- and three-electron Pauli spin blockade in series-coupled triple quantum dots”, Phys. Rev. Lett. **110**, 016803 (2013). DOI:10.1103/PhysRevLett.110.016803

S. Amaha, T. Hatano, W. Izumida, S. Teraoka, K. Ono, K. Kono, S. Tarucha, G. Aers, J. Gupta, and G. Austing: "Series-Coupled Triple Quantum Dot Molecules", Jpn. J. Appl. Phys. **51**. 02BJ06 (2012). DOI:10.1143/JJAP.51.02BJ06

S. Amaha, T. Hatano, H. Tamura, S. Teraoka, T. Kubo, Y. Tokura, D. G. Austing, and S. Tarucha: "Resonance-hybrid states in a triple quantum dot", Phys. Rev. B **85**. 081301 (2012). DOI:10.1103/PhysRevB.85.081301

〔学会発表〕(計5件)

天羽真一, M. Delbecq, 中島峻, 大塚朋廣, 大野圭司, D. G. Austing, 羽田野剛司, 樽茶清悟, “縦横結合4重量子ドットの電気伝導特性”, 日本物理学会 第68回年次大会 (関西大学, 2014年3月29日)

天羽真一, 羽田野剛司, 寺岡総一郎, 大野圭司, 河野公俊, 樽茶清悟: "直列2重量子ドットにおける波動関数 mapping と LO phonon 効果" 日本物理学会. (2012年3月24日). 関西学院大学

S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Teraoka, K. Ono, K. Kono, S. Taucha, J. Gupta and D. G. Austing: "Coulomb diamonds and Two-electron Spin Blockades in Cotunneling Regime of Serial Vertical Triple Quantum Dot Device" 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials. (2011年9月30日). 愛知県産業労働センター ウィンクあいち

泉田 渉, 天羽真一: "直列多重ドットで誘起される電子スピン状態とスピンプロケード" 日本物理学会. (2011年9月23日). 富山大学

天羽真一, 泉田 渉, 高橋 諒, 河野 公俊, 樽茶清悟, D. G. Austing, 大野 圭司: "2 重量子ドットにおける 3 電子スピンプロケード現象と核スピン効果" 日本物理学会. (2011年9月23日). 富山大学

〔図書〕

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

天羽 真一 (AMAHA SHINICHI) 独立行政
法人理化学研究所・創発物性科学研究セン
ター・研究員

研究者番号：90587924

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし