

平成 31 年 2 月 24 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02015

研究課題名(和文) 半導体量子ドット/共振器ハイブリッド構造における単スピンのコヒーレント制御

研究課題名(英文) Quantum control of individual spins in quantum dots coupled with a resonator

研究代表者

石橋 幸治 (ISHIBASHI, Koji)

国立研究開発法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・主任研究員

研究者番号：30211048

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：一般に、スピンと電磁波の相互作用は電荷と電磁波の相互作用の大きさに比べて小さいので、スピン軌道相互作用(SOI)を利用して電荷を介したスピンと光子の相互作用を利用することを考えた。そのため、SOIの強いGe/Siナノワイヤにおいて、弱反局在効果による磁気抵抗を用いて、コヒーレンス長、スピン緩和長、特に後者の電界依存性を評価した。

また、InSbやGe/Siナノワイヤ量子ドットを超伝導マイクロ波回路共振器中に設置し、極低温に置いてその共振特性の測定を行い、共振器と電荷の相互作用を調べた。その結果、量子ドットのコヒーレンスが十分に大きくないため、コヒーレントな相互作用が実現できなかった。

研究成果の概要(英文)：The spin-orbit interaction (SOI) was used to try to realize a strong interaction between individual spins in a quantum dots and a photon in a circuit resonator. The characteristic features of the SOI in the Ge/Si nanowires, such as the coherence length, spin relaxation time and their electric field dependence were studied by analyzing the magnetoresistance due to the anti-weak localization.

We have developed a technique to locate the quantum dots in a microwave coplanar waveguide superconducting resonator, and the resonator responses were measured in a milli-Kelvin temperatures, depending on the charge states and the coupling strength between the double dots. Unfortunately, the strong coherent coupling was not observed. It was found that it was because the decoherence in the quantum dots were very large compared with the coupling between the dots and the resonator.

研究分野：ナノデバイス工学

キーワード：スピン共振器相互作用 スピン軌道相互作用 半導体ナノワイヤ

1. 研究開始当初の背景

量子アニーリングマシンが開発されたことをきっかけに、近年、量子技術が急速に注目を集めている。量子コンピュータ開発にも、IBM やインテルなどの企業が参画し、超伝導型やシリコン量子ドットを用いたスピン型のものなど、従来の長い基礎研究からより現実性を目指して研究の方向性が集束しつつある。まだまだ基礎研究の段階ではあるが、その一つの考え方が、ハイブリッド化である。これまで、様々なタイプの量子ビット、あるいはそれを実現するための材料が研究されてきたが、超伝導型が最も進んでいる。超伝導型はデバイス作製が他のものより容易である、操作がしやすい点が利点である。そのことは、同時に十分なコヒーレンスを確保できないという問題点でもある。これに対して、スピン型では、特に核スピンを含まないシリコンで作製するとコヒーレンスが長いことが予測されており、量子情報を記憶しておく量子メモリーに適していると思われる。このように、超伝導型はロジックに向いており、スピン型はメモリーに向いているなど、量子ビットの特徴に応じたハイブリッド化には大きなメリットがあると考えられる。

2. 研究の目的

異なるタイプの量子ビットのハイブリッド化においては、その間の量子情報のやり取りが必要となり、そのプラットフォームとしてマイクロ波共振器中の光子と量子ビット間の相互作用を利用することが考えられる。量子ビットを2準位からなる人工原子だとみることができるので、この問題は、量子光学における共振器量子電磁気学と同じである。超伝導型であれ、スピン型であれ、量子ビットの2準位間のエネルギーはマイクロ波領域にあるので、損失の少ない超伝導体でコプレーナ型などの回路共振器をチップ上に作製することができる。共振器中の1光子と量子ビットの間に、量子力学的なコヒーレントな相互作用(ドレスド原子状態)を実現することができれば、光子を媒介として異なる量子ビット間の量子情報のやり取りが可能である。超伝導量子ビットにおいてはこのような相互作用(強結合相互作用と呼ぶ)がすでに実現されている。したがって、本研究では、マイクロ波回路共振器中に半導体量子ドットを作製するデバイスプロセスを開発し、量子ドット中の単一スピンとマイクロ波共振器中光子の間の強結合相互作用を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

一般に、電荷と電磁波(電界成分)の相互作用(電気双極子相互作用)に比べて、スピンと電磁波(磁界成分)の相互作用の大きさは小さい。そこで、スピンと電磁波の直接的磁気的相互作用を用いるのではなく、スピン軌道相互作用(SOI)を利用し、電荷を介

してスピンと電磁波の相互作用させることを行う。そのために、SOIが大きな材料として、InAs や InSb のようなナローギャップ半導体やホールをキャリアとする Ge/Si コアシェルナノワイヤ(Ge のコアを Si シェルでくるんだような構造を持つ)を用いた。長期的にはスピンのコヒーレンスの観点から、核スピンが少ない4族元素からなる Ge/Si 材料が有望であるが、前者はプロセス技術が後者に比べて比較的容易であるので、研究対象としては両方の材料を用いる。ナノワイヤは我々自身で成長するのではなく、ハーバード大学、インドホーヘン工科大学などの共同研究者から提供を受けた。

スピン軌道相互作用について調べるために、直流での磁気抵抗効果の測定を行い、SOI が強い場合に生じる弱反局在効果による正の磁気抵抗を解析することによって調べた。また、スピン軌道相互作用を電界で制御する可能性を明らかにするために、ナノワイヤに垂直に電界を印可することのできる構造を作製した。

マイクロ波応答の測定のために、Nb などの超伝導金属を用いてコプレーナ型の共振器をチップ上に作製し、電界が大きくなる位置の信号線とグランドの間に量子ドットを設置した。マイクロ波応答の測定は希釈冷凍機温度で行った。また、共振器内に存在する光子の数を単一光子レベルにまで下げて測定を行った。

4. 研究成果

(1) 弱局在によるスピン軌道相互作用の評価

ナノワイヤのうち、InSb と Ge/Si において測定を行うことができたが、比較的制御性良く測定を行うことのできるデバイスを作成

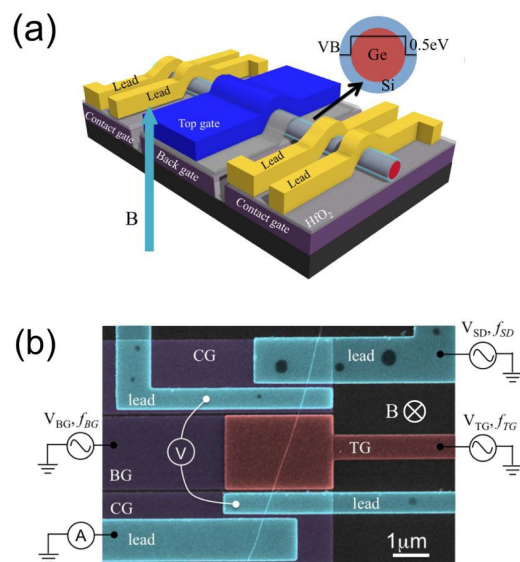


図1：磁気抵抗を測定するための試料構造の(a)模式図と(b)電子顕微鏡写真(見やすいように着色)

することができた Ge/Si コアシェルナノワイヤ（直径約 20nm、電極間の長さ 1 μ m）についての結果を記載する。

(1) - 1 デバイス作製プロセス

図 1 (a)に弱反局在特性測定のための試料構造の模式図と、(b)その走査電子顕微鏡写真を示す。この試料では、ナノワイヤの下と上に絶縁体（この試料では CVD 成長したシリコンナイトライド膜）を挟んで“大きな”金属ゲートを作製している。ナノワイヤと金属電極との接触は、

量子ドットを作製するためには、ナノワイヤの下に絶縁体を挟んで電子ビームリソグラフィ法を用いて線幅数十ナノメートルの金属フィンガーゲートを形成する。フィンガーゲートに適当に電圧を印可することにより量子ドットを形成する。

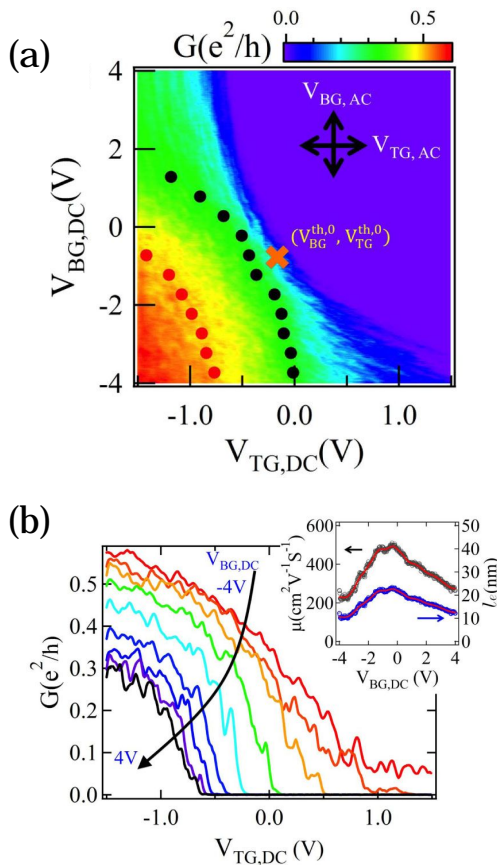


図 2 : (a)コンダクタンスのトップゲートとボトムゲート依存性のマッピング (b) ピンチオフ特性（挿入図は移動度と平均自由工程）

(1) - 2 弱反局在効果を用いたスピン軌道相互作用の評価

図 1 に示した試料を液体ヘリウム温度において磁場をナノワイヤに垂直に印可し、磁気抵抗効果を測定した。この試料では、ナノワイヤに垂直に（基板に対して垂直）ゲート電圧 ($V_{BG,DC}$ と $V_{TG,DC}$ 、バックゲート、トップゲートと呼ぶ) を印可することができる。その組み合わせにより、ホールを閉じ込めるポテンシャル形状を変えることができる。

図 2 (a)にソースドレイン電圧を一定にして、2つのゲート電圧を変化させたときのコンダクタンスのマッピングを示す（測定温度は 1.5K）。2つのゲート電圧の組み合わせによりコンダクタンスは大きく変化するが、黒丸と赤丸はコンダクタンスが一定となる場所を示し、赤の×はピンチオフ近傍で移動度が最大となる場所を示している。一般に、この程度の長さのナノワイヤのコンダクタンスには不純物散乱から来るコンダクタンスの揺らぎが含まれるため（図 3 (b)のゲート電圧特性に揺らぎによる不規則な振動が観測されている）それを取り除くために、2つのゲートに小さな交流電圧を印可し、揺らぎの効果を平均化して取り除くを行っている。平均自由工程はゲート電圧の条件によって変わるが、おおよそ 10-20nm 程度である。

図 3 (a)には、スピン軌道相互作用が大きい場合の局在効果に観測される典型的な正の磁気抵抗をいくつかの温度において測定した結果を示す。この正の磁気抵抗は、準 1次元の場合の理論式に、磁場の 2 乗に比例する古典的な磁気抵抗効果を加えることによりよくフィットすることができることが分かった。理論式とのフィッティングにより位相緩和長 (l_{ph}) とスピンの緩和長 (l_s) を求めることができ、その温度依存性を図 3 (b)に示した。これらの温度依存性のメカニズムを厳密に説明することはできないが、スピン緩和

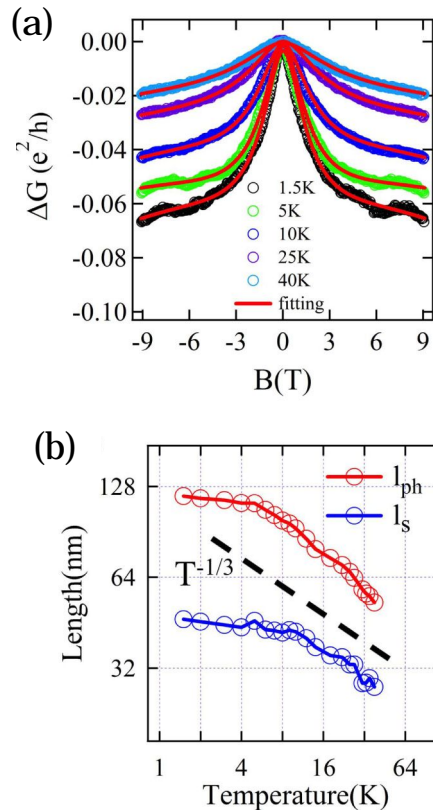


図 3 : (a)コンダクタンスの磁場依存性（変化分）(b)フィッティングから求めた位相緩和長 (l_{ph}) とスピン緩和長 (l_s)

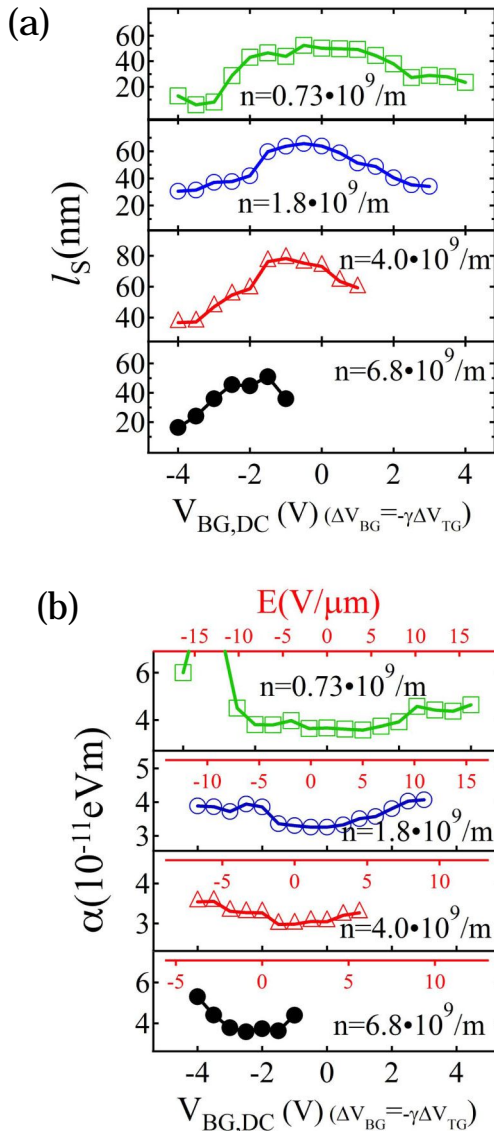


図4：ホール能動を一定に保ちながらバックゲートを変化させたときの(a) スピン緩和長とラシュバパラメータのバックゲート電圧依存性

和の機構は D'yakonov-Perel (DP) 機構だと考えている。その場合、ラシュバ型の SOI により電子はスピン歳差運動を行いながら不純物に散乱されながらその間直線運動を行う。

スピン緩和、スピン軌道相互作用の大きさの電界による影響を調べるために、ホール濃度が一定となるように2つのゲートを一定の関係を維持しながら変化させた。その場合、閉じ込めポテンシャルの底の傾き(閉じ込めポテンシャルの非対称性)が大きく変わることが期待できる。その結果を、図4(a)(スピン緩和長)と、(b)がラシュバ型 SOI の場合にその大きさを示すラシュバパラメータ(α)を示す。後者は、前者から求めることができるため、スピン軌道相互作用の大きさは、ラシュバパラメータ(α -パラメータ)で

評価することができる。図4(b)から、ゲート電圧の絶対値が大きくなれば、 α -パラメータが大きくなる傾向が分かる。すなわち、閉じ込めポテンシャルの非対称性が大きくなるほど、スピン軌道相互作用が大きくなる傾向があるといえる。ラシュバ型 SOI が電界の大きさに比例することを考えれば、定性的にはその傾向を理解することができる。また、その絶対値($\alpha_0 = \alpha / eE \sim 5 \text{ nm}^2$; E は電界)はバルクの値($\sim 0.4 \text{ nm}^2$)よりも1桁程度大きい。ナノの系で SOI が大きくなるという予想もあるが、正確にはよくわからない。

(2) 共振器と量子ドットの相互作用

(2) - 1 デバイス構造

超伝導共振器は Nb を用いてコプレーナ型の $\lambda/2$ 回路共振器を作製した。共振器内の電界の最大になるところに量子ドットを設置する。デバイスの写真を図5(a)全体像、(b)量子ドット部分のズームアップ像に示す。

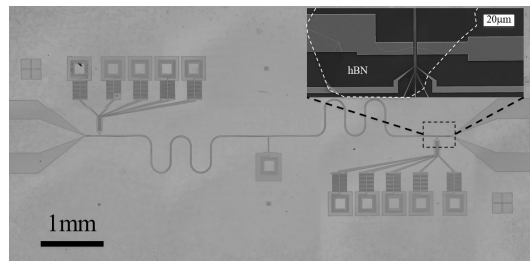


図5(a) 量子ドットを設置したマイクロ波共振器の全体像

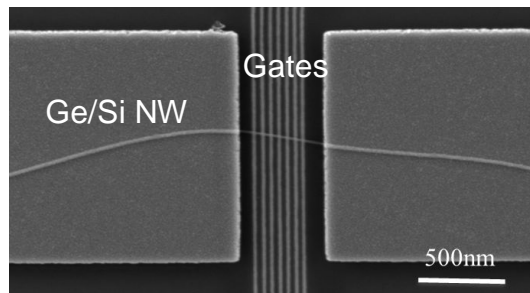


図5(b) 量子ドット部分の拡大図。ナノワイアの下にhBN絶縁体薄膜をはさんでその下に金属のフィンガーゲートがある。

ナノワイアは信号線とグラウンドの間に設置する。ナノワイア中に量子ドットを形成するためにhBN薄膜をはさんだ下に細いフィンガーゲートを設置している。このゲートに精の電圧をかけることにより(キャリアはホール)、トンネル障壁を形成し、2重結合量子ドットを形成することができる。また、共振器の信号線からは、インダクタンス(図5(a)中央部)を介して直流電流を量子ドットに流すことができる。これにより、直流電流測定によって2重結合量子ドットの形成を確認し、その特性を調べることができる。

(2) - 2 2重結合量子ドットの基礎的な特性

図6はこのようにして直流電流測定によって得られた2重結合量子ドットの電荷安

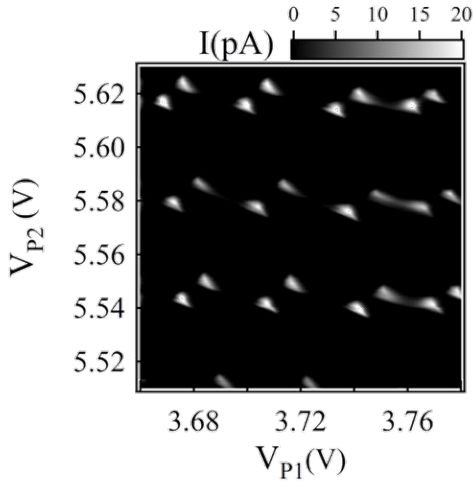


図 6 : 2 重量子ドットの電荷安定図の測定結果

定図である。各量子ドットにつけたゲート電圧の関数として電流を測定したところ、2重結合量子ドットに特有のハチの巣型のパターンが観測されており、2重結合量子ドットが形成されていることが分かる。この図より、2重量子ドットの重要なパラメータである、各ドットのチャージングエネルギーは、2.6meV, 2.8meV と求まり、各ゲートのレバアーム（ゲート電圧が量子ドットのポテンシャルの変化に変換される効率）は、0.077, 0.079 と求まる。このパラメータは、ゲート電圧の変化をドット内のポテンシャルの変化に変換するとき用いることができるので重要である。

(2) - 3 マイクロ波透過測定による共振器と2重量子ドットの結合評価

興味のあるのは、1個の過剰ホールが左か右のドットのどちらかに存在するようなゲート電圧変化である。ゲート電圧を変えて、ドット間の結合の強さを変えそれぞれの場合で、共振器と2重量子ドットの結合状態を調べた。図7に(a)ドット間の結合が弱い場合と(b)強い場合に、ゲート電圧をホールが左のドットから右のドットに移動するように変化させた場合の共振周波数の変化として示す。いずれの場合においても、ドット間のエネルギー準位差 (δ : デチューニング) がゼロになる付近で、共振周波数が変化している。

このような系は、電荷量子ビットと共振器の結合系としてとらえることができ、電荷量子ビット、共振器、量子ビットと共振器中の光子の相互作用の3つの項からなる Jaynes-Cummings ハミルトニアンで記述することができる。量子ビットと共振器の相互作用は、2準位系としての量子ビットによる光子の吸収と放出プロセスによってあらわすことができる。共振器の共振周波数と量子ビットのエネルギーが一致したところで、ラビ

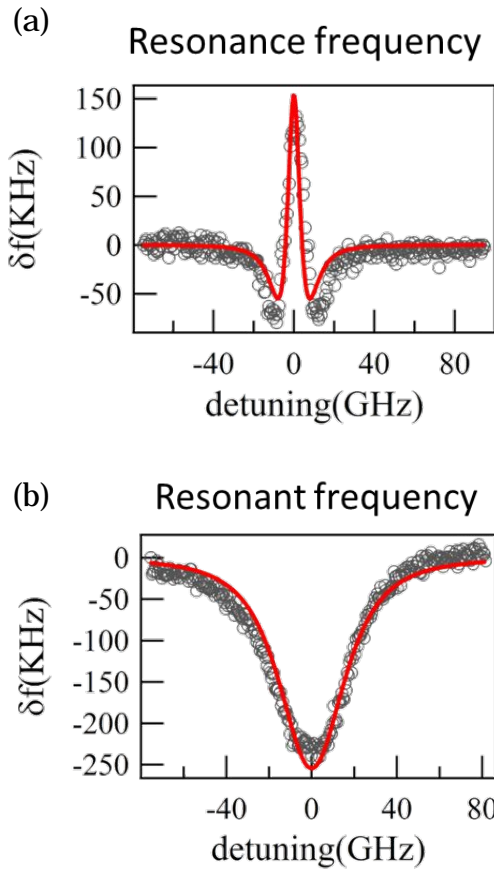


図 8 : 量子ビットのデチューニングを変化させたときの測定された共振周波数の変化。ドット間の結合が (a) 弱い場合と (b) 強い場合。(いずれも、測定温度は 100mK 程度)

分裂が生じることが特徴である。しかし、実際にはデコヒーレンスがあるために、それが観測されるかどうかは自明ではない。実際、デコヒーレンスを考慮した場合のモデル計算で図7の結果をフィットすることにより、量子ビット-共振器結合系のパラメータを得ることができる。それらを ($g_0, 2t_c, \gamma, f_0$)、すなわち (量子ビットと共振器の結合強さ、ドット間の結合エネルギー、量子ビットのデコヒーレンス、共振器の共振周波数) を周波数を単位として求めると、ドット間の結合が弱い場合には、(69MHz, 4.26GHz, 14GHz, 5.98GHz)、また、ドット間の結合が強い場合には、(77MHz, 27GHz, 16GHz, 5.98GHz) と求めることができる。いずれの場合にも、 $g > g_0$ 、すなわち、デコヒーレンスが量子ビットと共振器の結合の強さを上回っていることがわかる。ここで、共振特性の Q 値から求まる共振器の損失によるデコヒーレンスレートは量子ビットのデコヒーレンスレートに比べて十分遅いことから、その影響は無視している。このことから、本実験では量子ビットと共振器の強い結合が実現されていないことを示している。

量子ビットのデコヒーレンスの原因としては、電圧のノイズが考えられるが、本実験

では電圧ノイズが最小となるバイアス条件（デチューニングがゼロにおいて共振器の共振周波数と量子ビットのエネルギーを一致させる）を実現できていない。したがって、現時点では電荷と共振器の強い量子的な結合が実現できていないので、それを介したスピンと共振器の強い結合も実現はできていない。最適なバイアス条件でのさらなる実験が期待される。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者は下線）

〔雑誌論文〕（計4件）

1. Rui Wang, Russell S. Deacon, Jun Yao, Charles Lieber, and Koji Ishibashi, “Electrical modulation of weak-antilocalization and spin orbit interaction in dual gated Ge/Si core/shell nanowires”, *Semicond. Sci. Technol.*, 32 094002 (11pages) (2017) DOI: 10.1088/1361-6641/aa7ce6 (査読有)
2. Rui Wang, Russell S. Deacon, Diana Car, Erik P. A. M. Bakkers, and Koji Ishibashi “InSb nanowire double quantum dots coupled to a superconducting microwave cavity”, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 203502 (4 pages) (2016) DOI: 10.1063/1.4950764 (査読有)
3. Jian Sun, Russell Deacon, Rui Wang, Jun Yao, Charles Lieber, Koji Ishibashi, “Helical Hole State in Multiple Conduction Modes in Ge/Si Core/Shell Nanowire”, *Nano Lett.* 18, 6144-6149 (2018) DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b01799
4. Rui Wang, Russell S. Deacon, Jian Sun, Jun Yao, Charles M. Lieber, Koji Ishibashi, “Gate Tunable Hole Charge Qubit Formed in a Ge/Si Nanowire Double Quantum Dot Coupled to Microwave Photons”, *Nano Lett.* 19, 1052-1060 (2019) DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b04343

〔学会発表〕（計8件）

1. K. Ishibashi, R. Wang and R. S. Deacon (invited), “Double quantum dots embedded in a superconducting coplanar waveguide resonator”, 2017 Sweden-Japan International Workshop on Quantum Nanophysics and Nanoelectronics (QNANO2017), March 23-24th, 2017, Yokohama, Japan
2. Rui Wang, Russell S. Deacon, Jun Yao, Charles M. Lieber and Koji Ishibashi, “Weak Anti-localization Study of Spin Orbit Interaction in Single Ge/Si Core/Shell Nanowires under Dual Electrical Gating”, 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2016),

Beijing, China, Jul.31-Aug.5, 2016.

3. Rui Wang, Russell S. Deacon, Diana Car, Erik P. A. M. Bakkers and Koji Ishibashi, “Microwave Resonance through the Superconducting Circuit Cavity Coupled with InSb Double Quantum Dots”, 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2016), Toyama, Japan, June 26-30, 2016.
4. K. Ishibashi, R. Wang and R. S. Deacon (invited), “InSb double quantum dots embedded in a superconducting circuit cavity - Towards strong spin-photon coupling -”, The 18th International Symposium on the Physics of Semiconductors and Applications (ISPSA 2016), Jeju, Korea, 3-7th of July, 2016
5. Rui Wang, Russell S. Deacon, Diana Car, Erik P. A. M. Bakkers and Koji Ishibashi, “InSb Nanowire Double Quantum Dots Coupled to a Superconducting Microwave Cavity”, 第63回応用物理学学会春季学術講演会, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2016年3月19日-22日

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石橋幸治 (ISHIBASHI Koji)
国立研究開発法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・主任研究員
研究者番号：30211048

(2) 連携研究者

ディーコン・ラッセル (DEACON S. Russell)
国立研究開発法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・専任研究員
研究者番号：40552443

ワン・ルイ (WANG Rui)
国立研究開発法人理化学研究所・石橋極微デバイス工学研究室・客員研究員
研究者番号：20700967

(3) 研究協力者

Charles M. Lieber (Harvard University)
Erik P. A. M. Bakkers (TU Eindhoven)