

平成 21 年 7 月 21 日

報道機関各位

独立行政法人 科学技術振興機構 (JST)

独立行政法人 産業技術総合研究所

東北大学 電気通信研究所

## 半導体人工分子の量子状態を電気的に測定する方法を開発 —量子情報処理への応用に期待—

JST 目的基礎研究事業の一環として、独立行政法人 産業技術総合研究所 (以下、産総研) の今村 裕志 主任研究員、JST の余越 伸彦 研究員らは、ガリウムヒ素 (GaAs) を用いた半導体人工分子<sup>注1)</sup> (二重量子ドット<sup>注2)</sup>) に閉じ込めた 2 電子スピンの量子力学的重ね合わせ<sup>注3)</sup> 状態を電気的に測定する方法を理論的に開発しました。

電子は電気的な性質である“電荷”のほかに磁気的性質の“電子スピン”を併せ持っています。近年、この電子スピンをエレクトロニクスに積極的に取り入れる「スピントロニクス」と呼ばれる試みが注目を集めています。特に半導体で作られた人工的な原子や分子に閉じ込められた電子スピンは、将来の量子情報処理デバイスへの応用が期待されています。

本研究グループは、半導体二重ドットに閉じ込められた 2 つの 2 電子スピン状態 (スピナー重項・三重項<sup>注4)</sup>) の量子力学的重ね合わせを電気的に測定する方法を理論的に開発しました。従来の測定方法ではスピナー重項の成分と三重項の成分それぞれが現れる確率を知ることしかできませんでしたが、本方法を利用することで確率とともに 2 状態間の量子力学的な相対位相を検出することができ、2 つの電子スピンの量子力学的な状態を完全に測定することが可能になりました。このような測定方法は基礎物理学の観点から興味を持たれるだけでなく、量子情報処理デバイスの開発に必要な量子状態の初期化や演算結果の確認方法を提供するものであり、半導体人工分子を使った量子情報処理デバイスの開発に大きく貢献することが期待されます。

本研究は、東北大学電気通信研究所の小坂 英男 准教授と共同で行ったものです。

本研究成果は、米国物理学会誌「Physical Review Letters」に受理され、オンライン版で近日中に公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 CREST

研究領域：「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

(研究総括：山本 喜久 情報・システム研究機構 国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系 教授/スタンフォード大学 応用物理・電気工学科 教授)

研究課題名：単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換

研究代表者：小坂 英男 (東北大学電気通信研究所 准教授)

共同研究者：今村 裕志 (独立行政法人 産業技術総合研究所 主任研究員)

研究期間：平成 16 年 10 月～平成 22 年 3 月

JST はこの領域で、情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築を目指しています。上記研究課題では、ナノテク、スピントロニクス、フォトニクス、量子情報を融合した分野を開拓し、光子キュービットから電子スピンキュービットへの量子メディア変換を目指しています。

## <研究の背景と経緯>

近年、電子商取引が身近になり企業や個人の情報セキュリティ管理が問題になる中、公開ネットワーク上での暗号技術の向上はますます重要視されています。暗号技術向上の1つの方向性として、微小な世界を記述する量子力学の性質を利用した量子情報技術が注目を集めています。量子力学の考え方では、私たちが普段認識している世界とは異なる現象が起きています。量子の重ね合わせはその1つであり、0と1で表示されるデジタル世界とは異なり、0でも1でもある状態が存在すると考えられています。重ね合わせ状態は外部から盗聴される（情報が抜き取られる）とその特殊な性質（量子性）を失うため、ある意味では絶対に安全な情報通信手段と言えます。

量子情報の最小単位である量子ビット<sup>注5)</sup>には光・電子などさまざまな候補が挙げられています。なかでも将来的な汎用性・集積性を考慮すると、現在の通信デバイスやコンピュータの主要部を占める半導体中の電子を量子情報として活用するというのは自然な流れであると思われます。特に、2つの電子スピン間の相関を量子ビットとするアイデアは集積性や演算効率の面から有用であることが知られており、広く研究されています。この電子スピン量子ビットの実用化は将来の高度情報化社会に向けて急務と思われます。

産総研と東北大学電気通信研究所は、仙台電波工業高等専門学校と共同で、光子と電子スピンとの間の量子メディア変換<sup>注6)</sup>の研究を行っており、これまでに光を用いて半導体中の電子スピン状態をコヒーレントに書き込み・読み出すことに成功しています。本研究では、電子スピンによる量子演算研究の現状を踏まえて、2つの光子から二重量子ドットに閉じ込められた2電子スピンの転写された任意の量子状態を電氣的に読み出す測定方法の開発を目指しました。

図1のように2つの量子ドットが1つずつ電子を保有する時、従来の測定方法ではパウリスピンブロック<sup>注7)</sup>現象（図2）が生じるかどうかで2電子状態がスピン一重項なのか三重項なのかを判定し、量子情報の読み出しを行っていました。しかし、この方法で重ね合わせ状態を測定するとスピン一重項・三重項のそれぞれが現れる確率しか検出できず、量子力学的な重ね合わせ状態の一面しかとらえることができませんでした。

## <研究の内容>

本研究では今回、左右の量子ドット上（図1のLとR）と量子ドット間（図1のB）に配置されたゲート電極の電圧を断熱的に調整した後、左右の量子ドットに滞在する電子数を測定するという方法を提案しました。ここでゲートLとRの操作は2つの量子ドット内の静電エネルギーを、ゲートBの操作は電子の量子トンネル確率をそれぞれ変化させることに相当します。本研究グループは、半導体中電子のスピン一軌道相互作用<sup>注8)</sup>を考慮した量子トンネル過程を取り入れ、理論的な解析を行いました。

図3に示すような一連のゲート操作を行い、2つの量子ドットに滞在する電子数をそれぞれ測定し、電子の集団として処理するアンサンブル平均を取ると、左右の電子数差は重ね合わせ状態における一重項と三重項の相対位相の関数として振動することを見いだしました。これによりスピン一重項・三重項が現れる確率と2状態間の相対位相を同時に測定することができることとなります。

量子ビットとして利用するスピン一重項（ $S$ ）と三重項（ $T_0$ ）の任意の重ね合わせ状態は、ブロッホ球の球面上の点として表現できます（図4）。従来の方法で得られる情報は球

面の緯度のみでしたが、本研究成果では球面上の点の位置（緯度と経度の両方）を特定し量子状態の全体像を推定することが可能です。この点において本研究成果は画期的です。このような測定方法は基礎物理学の観点から興味深いだけでなく、量子情報処理デバイスの開発に必要な量子状態の初期化や演算結果の確認方法を提供するものであり、半導体人工分子を使った量子情報処理デバイスの開発に大きく貢献することが期待されます。

#### ＜今後の展開＞

電子スピンを利用した量子ビットの実用化には、GaAs など材料のさらなる高品質化に加え新たな量子機能の付加・強化のための理論的提案も不可欠です。固体素子による量子インターフェースの実現に向けて新たな量子デバイスの設計を行い、将来の量子情報社会の基盤技術を確立したいと考えています。

<参考図>

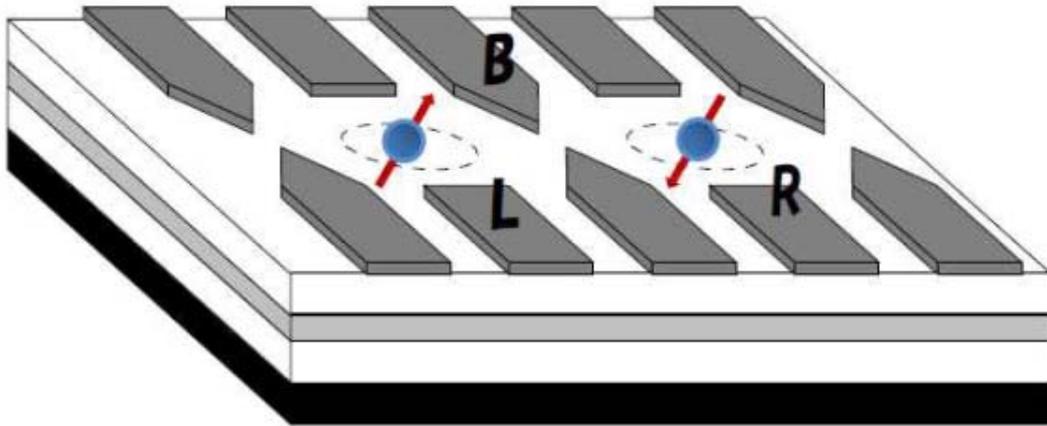


図1 二重量子ドットの模式図

青い球が1個の電子を、赤い矢印がスピンの向きを、点線は電子が存在し得る範囲を表す。

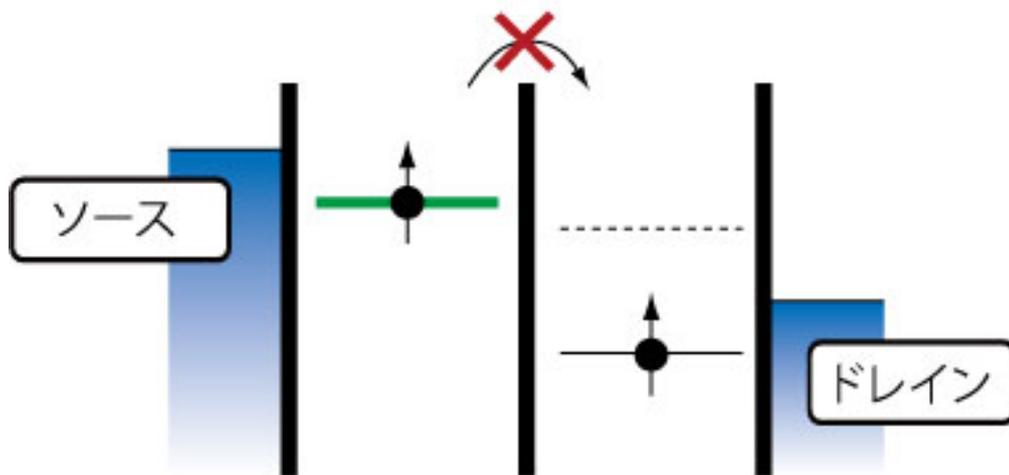


図2 パウリスピンブロックード

2つのスピン（矢印で表す）の向きが同じ（平行）時、パウリの排他律により電子は移動できなくなる。

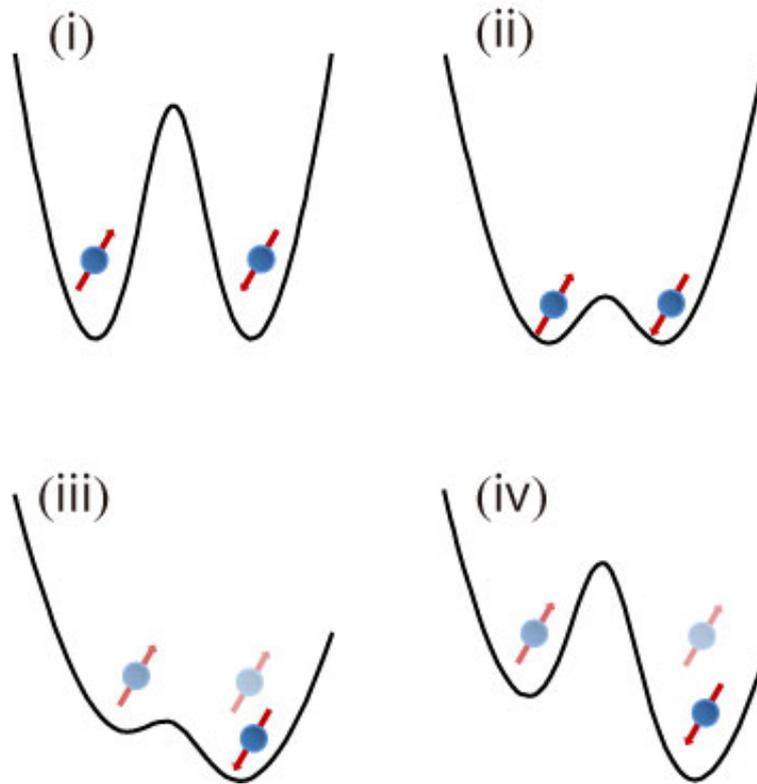


図3 一連のゲート操作

- (i) 測定される2電子は初めに左右の量子ドットに1つずつ閉じ込めておく。
- (ii) 中央の障壁を引き下げ、量子ドット間の電子の移動を可能にする。
- (iii) 電圧をかけることで右の量子ドットにいる電子はスピン—軌道相互作用によるスピン反転を起こしながら確率的に左の量子ドットへ移動する。
- (iv) 再び障壁を引き上げた後、左右の量子ドットに存在する電子数を測定する。

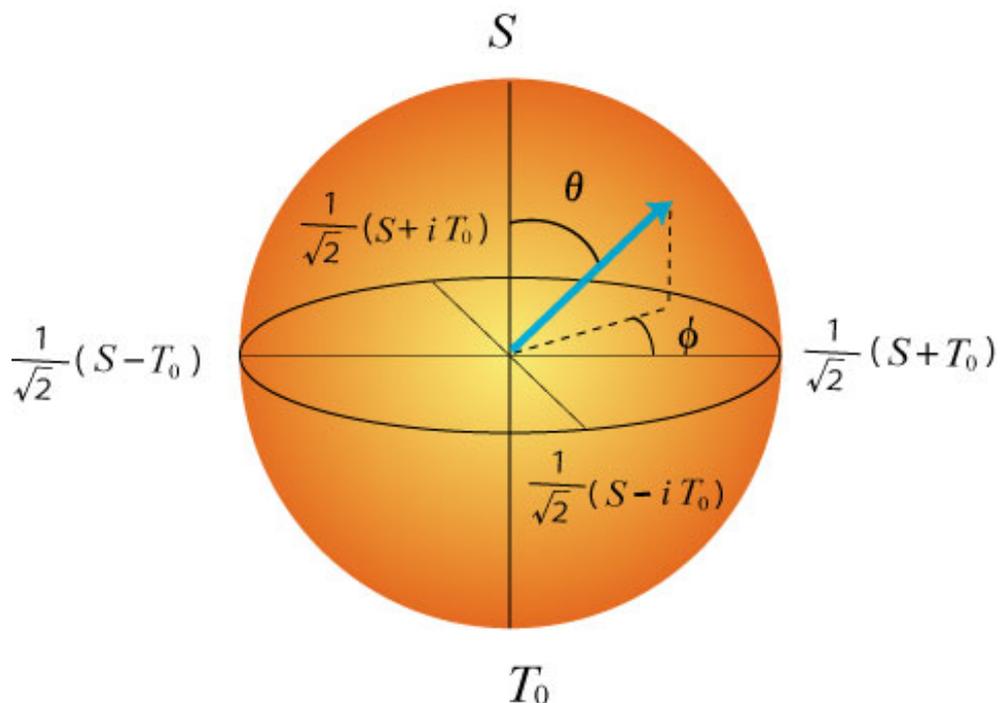


図4 スピン量子ビットのブロッホ球

## <用語解説>

### 注1) 半導体人工分子

半導体でできたナノメートルスケールの箱である量子ドットに電子を閉じ込めたものを半導体人工原子と呼ぶ。この半導体人工原子がいくつか結合したものが半導体人工分子である。本研究で用いた半導体人工分子は、電子を1つずつ閉じ込めた半導体人工水素原子2つからなる半導体人工水素分子である。

### 注2) 量子ドット

電子や正孔（もしくはそれらが結合した励起子）を、半導体の微小空間に閉じ込めるための構造。本研究では、半導体表面に取り付けた金属ゲート電極による静電エネルギーにより電子を閉じ込める構造を考える。微小空間の大きさは、電子の量子効果が顕在化するよう、数十 nm 程度かそれ以下にされている。二重量子ドットとは2つの量子ドットが結合したものである。

### 注3) 量子力学的重ね合わせ

量子力学において、物理系（例えば電子や光子）の状態は波動関数により記述される。この時、物理系は複数の状態の可能性を同時に持つことができ、これを量子力学的重ね合わせと言う。観測される（量子状態の情報が取り出される）と波動関数は確率的にいずれかの状態に収縮し、その量子性を失う。その時の確率は重ね合わせにおける、それぞれの状態の振幅により決定される。

### 注4) スピン一重項・三重項

2つの電子スピン間の量子相関。一重項状態では2つのスピンは反平行（向きが逆）であり、三重項状態では2つのスピンが平行（同じ向き）となる。電子スピンを利用した量子ビットでは“ビット”としてこの2つの状態を用いることが多い。

### 注5) 量子ビット

量子力学的重ね合わせを利用した超並列演算を行う量子コンピューターで用いる2準位“ビット”のこと。量子コンピューターは  $n$  個の量子を重ね合わせることで、従来のコンピューターが  $2^n$  回の演算 ( $n$  ビット) を要していた計算を1回で行える。量子ビットの候補として電子スピン・核スピン・超伝導体・光子などさまざまな候補が提案されている。

### 注6) 量子メディア変換

異なる特色を持つ2種類の量子ビットの間で量子情報をやり取りすること。近年、主に光子から電子スピン・核スピン・原子集団などの物質量子ビットへの量子メディア変換について研究が行われている。

### 注7) パウリスピンブロックード

「スピンの向き・位置が同じ2つの電子は同一軌道に存在できない」というパウリの排他則により、電子スピンのそろった2つの電子は同一の量子ドットに滞在できない。従って二重量子ドットのそれぞれが1つずつ電子を保有している時、スピンのそろった（スピン三重項を組む）電子はそれぞれの量子ドットに滞在し続けるのでソースドレイン間の電流が流れない（電子が移動しない）。この状態をパウリスピンブロックード状態と呼ぶ。

注8) スピン—軌道相互作用

電子のスピン角運動量と軌道角運動量との間に起こる相対論的な相互作用。GaAs 半導体においては、ガリウム (Ga) とヒ素 (As) の構造非対称性や積層構造による局所的な電場に起因する。

<論文名>

“Electrical measurement of a two-electron spin state in a double quantum dot”  
(2 電子スピン状態の量子力学的重ね合わせを電氣的に測定)

<お問い合わせ先>

<研究内容に関すること>

今村 裕志 (イマムラ ヒロシ)

余越 伸彦 (ヨコシ ノブヒコ)

独立行政法人 産業技術総合研究所

ナノテクノロジー研究部門 ナノ構造物性理論グループ

〒305-8568 茨城県つくば市梅 1-1-1 中央第2

Tel : 029-862-6713 Fax : 029-862-6574

E-mail : h-imamura@aist. go. jp

小坂 英男 (コサカ ヒデオ)

東北大学電気通信研究所 准教授

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1

Tel : 022-217-5072 Fax : 022-217-5071

E-mail : kosaka@riec. tohoku. ac. jp

<JSTの事業に関すること>

廣田 勝巳 (ヒロタ カツミ)

独立行政法人 科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究領域総合運営部

〒102-0075 東京都千代田区三番町 5 三番町ビル

Tel : 03-3512-3524 Fax : 03-3512-3531

E-mail : crest@jst. go. jp

<報道担当>

独立行政法人 科学技術振興機構 広報ポータル部

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho@jst.go.jp

独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部 広報業務室

〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2

Tel : 029-862-6216 Fax : 029-862-6212

E-mail : presec@m.aist.go.jp

東北大学電気通信研究所 総務課 研究協力係

〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1

Tel:022-217-5422