

NTT持株会社ニュースリリース

(報道発表資料)

2014年10月6日

高精度電流標準の実現につながる高速な単電子転送に成功 ～シリコントランジスタ中に存在する電荷トラップにより電子を1個ずつ転送～

日本電信電話株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:鶴浦博夫、以下 NTT)は、シリコントランジスタ※1中に存在する電荷の閉じ込め状態であるトラップ準位※2を介した単電子転送(電子を一つずつ正確に運ぶ技術)の高速化に世界で初めて成功しました。

この単電子転送技術により一つ一つの方向に正確に転送された電子の流れは、精度の高い電流として取り出せるため、近年提案された電流の基本単位であるアンペアの再定義に繋がる高精度な電流源(電流標準※3)への応用が期待されます。さらに、従来の精度を凌駕する高精度化を図ることで新しいSI単位系での電流の高精度化を実現すると、電気標準分野・計測産業分野に貢献すると考えられます。

この成果は、2014年10月6日(英国時間)に英国科学誌「ネイチャー・コミュニケーションズ」で公開されます。

なお、本研究の一部は、内閣府及び独立行政法人日本学術振興会による最先端・次世代研究開発支援プログラム(GR103)の助成を受けて行われました。

1. 研究の背景

NTT物性科学基礎研究所では、電荷量の最小単位である電子を一つ一つ操作し、検出する技術の研究を進めています。単電子デバイスはその省エネルギー性と高い電荷感度のため超低消費電力情報処理回路や超高感度センサなど極限エレクトロニクスの実現が可能として注目されており、NTT物性科学基礎研究所では、これまでに安定性と再現性に優れたシリコンを用いた単電子転送素子や単電子検出素子の動作を実現してきました。

一方、国際単位系(SI)※4での電流の基本単位であるアンペアは、質量の基本単位を定めているキログラム原器※5の廃止とともに再定義されることが2011年に提案され、高い注目を集めています。新しいSI単位系では、これまで測定値であった電気素量 e を固定値とし、その値から電流標準によってアンペアが設定されますが、電子を一つずつ正確に運ぶことのできる素子である単電子転送素子は e とアンペアを直接的に結びつける(図1□)ため、究極的な電流標準として利用できると期待されています。

単電子転送素子の多くは人工的に作られた微細な領域(単電子島※6)に電子を捕えることで、転送を制御していますが、転送精度向上には単電子島を微細化し電子を捕えるためのエネルギー(電子付加エネルギー※7)を大きくする必要があります(図2□)。しかし、半導体素子の微細化技術には限界があり、精度向上の壁となっていました。

NTT物性科学基礎研究所では、これまでに培ってきた単電子操作技術の高い精度と信頼性が要求される電気標準分野へ適用するため、研究を進めてまいりました。

2. 研究の成果

今回、NTT物性科学基礎研究所は、シリコントランジスタ中に存在する極めて微細な閉じ込め領域を持つトラップ準位(図3□、図4□)を利用した、最高動作周波数3.5ギガヘルツの高速単電子転送(測定温度17ケルビン※8)に世界で初めて成功しました(図5□)。この単電子転送のエラー率※9は電流計で計測可能な最小レベル($\sim 10^{-3}$)以下でした。この高速でのエラー率は、現在研究が進められている単電子転送素子の中でも極めて低い値です。さらに、理論的予測では絶対温度10～20ケルビン、周波数1ギガヘルツでエラー率が 10^{-8} 以下(電流標準としての目標値)になることが見込まれ、高い転送精度を持っている可能性も示されました。

行った実験の説明

- 〈1〉 シリコンの微細加工技術を利用し、シリコン細線上に2つの微細ゲート電極(ゲート1, ゲート2)を有するトランジスタを形成し、更にそれらの上面を全て覆うように上層ゲート電極を形成した2層ゲートを持つ構造を作製しました(図3)。ゲート1とゲート2に負の電圧を印加すると、2つのゲート間のシリコン細線領域に単電子島が電氣的に形成されます。上層ゲートはこの単電子島のポテンシャルを制御します。作製した素子の中からゲート1の右端の下にトラップ準位があるものを選定しました。
- 〈2〉 ゲート2に負の電圧を印加することでゲート2直下のシリコン細線にポテンシャルバリアを形成し、ゲート1に高周波のクロック信号を印加します(図3、図4)。ゲート1直下のシリコン細線のポテンシャルバリアが十分低い状態(クロック信号が正の値)でゲート1より左側のシリコン細線から単電子をトラップ準位に捕獲した後、ゲート1直下のシリコン細線のポテンシャルバリアを十分高くし(クロック信号が負の値)、捕獲された単電子をゲート2より右側のシリコン細線に放出します。シリコン細線の左から右に電子が転送される結果生じる単電子転送電流を絶対温度17ケルビンで測定しました。
- 〈3〉 上層ゲート電極に加える電圧を変化させるとトラップ準位の大きな電子付加エネルギーを反映して、幅広い電流プラトー※10を観測することができます(図4)。上層ゲート電極に印加する電圧を大きくすると、トラップ準位だけではなく単電子島を介した単電子転送に起因する電流プラトーも観測されますが、トラップ準位によるものに比べ幅が狭くなっています。プラトー幅が狭いほど転送精度は悪いので、本構造では単電子島を介した転送よりもトラップ準位を介した転送の方がより高精度であると言えます。
- 〈4〉 クロック周波数を上昇させて電流プラトーを測定すると、転送電流 ef が増加します。 1ef の電流プラトーの測定値は、3.5ギガヘルツまで理論値と非常に良く一致しました(図5)。3.5ギガヘルツでの詳細な転送電流計測より、エラー率は電流計で測定できるレベル($\sim 10^{-3}$)以下であることがわかりました。

3. 技術のポイント

(1) シリコンナノ構造作製技術、シリコン単電子素子測定技術

NTT物性科学基礎研究所で長年蓄積されてきた、ナノメートルスケールで2層ゲート構造を持つシリコントランジスタをウエハレベルで作製する技術により、多数の素子を歩留り良く作製することができます。これにより、最適な素子の選定を効率良く行うことができます。更に、シリコン単電子素子の数多くの研究から得られた単電子操作に関する知見により、トラップ準位を介した転送の動作原理解明と高速動作達成に繋がりました。

(2) トラップ準位の利用とその転送機構の明確化

単電子島の代わりに自然界に存在する極めて微細な閉じ込め領域を持つトラップ準位を用いると、人工的には作成困難な10ナノメートル以下のサイズでの閉じ込めによる電子付加エネルギーを利用することができ(図2)、今回の高精度な動作に繋がりました。このトラップ準位を介した単電子転送の転送機構を明確化するため、トラップ準位への電子捕獲と電子放出を詳細に調べ、電圧を制御することで捕獲・放出速度を大きく変調できることを見出しました。この知見を基にして、捕獲と放出の速度を増加させることで高速動作を達成しました。さらに、転送電流の温度依存性なども調べ、転送精度に関する理論的予測を行うこともできました。

4. 今後の展開

標準化可能なレベルの高精度単電子転送の実証実験を行い、電流標準の実現を目指します。また、従来の精度を凌駕する高精度化を図ることにより、新しいSI単位系での電流の高精度化を実現し、電気標準分野・計測産業分野への貢献を目指します。また、今回の技術はトラップ準位に限らず他の局在準位を介した転送にも適用できるので、意図的に導入した不純物原子の準位を利用することにより、素子歩留りの向上が期待できます。そのような技術による歩留りの高い電流標準の実現のみならず、さらに長期的には、素子の集積化により電子1個の操作に基づく超低消費電力情報処理へと応用し、低エネルギー社会への貢献も目指していきます。

論文掲載情報

G. Yamahata, K. Nishiguchi, A. Fujiwara
“Gigahertz single-trap electron pumps in Si”
Nature Communications (2014).

用語解説

※1 シリコントランジスタ

半導体のシリコンを利用して作製された、電気信号のスイッチや増幅を行うことのできる素子。今回は、シリコン上に絶縁膜(シリコン酸化膜)を介して形成されたゲート電極に電圧を印加することによりシリコン中に流れる電流をON-OFFさせる、電界効果トランジスタを利用しています。

※2 トラップ準位

原子サイズの構造に起因して自然に形成される、電荷を捕獲可能なエネルギー状態。シリコンとシリコン酸化膜の界面に存在する界面準位やシリコンの結晶欠陥に起因する欠陥準位等があります。

※3 電流標準

電流の基本単位であるアンペアの基準となるもの。現在、アンペアは真空中で無限に長い2本の導線に同じ大きさの電流を流した際に働く力により定義されています。しかし、この定義通りの実験をすることは困難であることなどから、SI単位系の再定義では、電気素量 e を固定値としアンペアを設定することが提案されました。

※4 国際単位系(SI)

時間(秒:s)、長さ(メートル:m)、質量(キログラム:kg)、電流(アンペア:A)、熱力学温度(ケルビン:K)、物質량(モル:mol)、光度(カンデラ:cd)の7つの基本単位を定義し、その他の単位をこれらの組み合わせで取り扱う、国際的に採用されている単位系。国際単位系(SI)の再定義では、基本単位を定義するのではなく、基礎物理定数を固定値とし、それを基にして基本単位を設定する方法が提案されました。

※5 キログラム原器

白金イリジウムという合金で作られた分銅で、現在質量の定義として用いられています。国際単位系(SI)の再定義で特に注目を集めた点がキログラム原器の廃止でした。キログラム原器の質量が表面汚染により劣化することが問題となっており、長期安定性を確保するために普遍的な質量の定義を行うことが望まれてきました。新しい定義では、プランク定数を固定値としキログラムを設定するとされています。

※6 単電子島

微細な島構造であり、構造の持つ電子付加エネルギーが熱に起因するエネルギーの揺らぎより十分に大きく、一定数の電子を蓄積できる構造。蓄積できる電子数は外部からの印加電圧によって制御することが可能です。

※7 電子付加エネルギー

ある領域に一つの電子を付け加えるために必要なエネルギー。その値は主に電子の静電気的な反発に起因する帯電エネルギーと、電子の閉じ込めに起因する量子力学的なエネルギーで決定されます。電子付加エネルギーは領域のサイズが小さいほど大きな値を持つことになります。

※8 ケルビン

温度の単位。 0°C は273.15ケルビンに相当します。

※9 エラー率

正確には相対エラー率と呼ばれる。単電子転送を1回行った際に、転送エラーが発生する確率。例えばエラー率 10^{-3} とは1000回の転送で平均1回のエラーが発生することを意味します。

※10 電流プラトー

電圧を変化させても電流値がほとんど変化せず一定値を取っている領域。

別紙・参考資料

- ▶ [図1 単電子転送素子の概念図](#)
- ▶ [図2 単電子島とトラップ準位の比較](#)
- ▶ [図3 素子構造と測定方法](#)
- ▶ [図4 トラップ準位を介した単電子転送電流の計測](#)
- ▶ [図5 3.5ギガヘルツでの高速単電子転送](#)

本件に関するお問い合わせ先

■ 日本電信電話株式会社
先端技術総合研究所 広報担当
a-info@lab.ntt.co.jp
TEL 046-240-5157



ニュースリリースに記載している情報は、発表日時点のものです。現時点では、発表日時点での情報と異なる場合がありますので、あらかじめご了承くださいとともに、ご注意をお願いいたします。

[NTT持株会社ニュースリリース インデックスへ](#)

NTT持株会社 ニュースリリース

[▶ 最新ニュースリリース](#)

[▶ バックナンバー](#)

[▶ English is Here](#)

NTT持株会社 ニュースリリース内検索

1997 ▼ 年 04 ▼

月 ~

2021 ▼ 年 11 ▼ 月

検索

NTTグループの情報は
こちらからご覧いただけます。



[▲ このページの先頭へ](#)

[▶ 更新履歴](#) [▶ サイトマップ](#) [▶ お問い合わせ](#) [▶ 著作権](#) [▶ プライバシーポリシー](#) [▶ 情報セキュリティポリシー](#) [▶ ウェブアクセシビリティポリシー](#) [▶ 個人情報保護について](#)

Copyright © 2021 日本電信電話株式会社