

熱ノイズを選び分けて電流を流すことに成功 ——マクスウェルの悪魔による発電

NTTは、トランジスタ内でランダムな方向に動く電子（熱ノイズ）を観測し、一方向に動く電子のみを選び分けることで電流を流し、電力を発生することに成功しました。これは、熱力学分野で長年パラドックスとして議論されていたマクスウェルの悪魔*の原理を利用することで実現したものです。

熱ノイズは無秩序な電子の動きであり、電子の動きを平均化すると、どの方向にも動いていません。一方、電流は一定の方向への電子の流れです。通常、外部電源などを用いず、無秩序な熱ノイズから、電流という秩序性を持った動きを生み出すことは不可能です。しかし、もし個々の電子の動きを観測し一定の方向に動く電子のみ選び出すことができれば、電流を生成することができるはずです。この、電子を選び出す作業をするのが「マクスウェルの悪魔」と呼ばれるもので、150年以上前に思考実験として提案されました。しかし、実際に「マクスウェルの悪魔」を実現することは困難であり、これまでの実験は基本的な原理実証にとどまっていた。

NTTは、トランジスタ内の電子1個の動きを観測し、その結果に基づいてトランジスタを操作する技術を用いることにより、電流を生成することに成功しました。これにより、初めて「マクスウェルの悪魔」を利用した熱ノイズからの電力の生成が実現できました。

■研究の背景

通常、熱ノイズのような無秩序な動きから、外部電源を用いずに、電流のような秩序を持った動きを生み出すことはできません（熱力学第二法則）。個々の電子の動きを観測して選び出すマクスウェルの悪魔は、この熱力学第二法則を破っているように見え、150年以上議論が続けられてきました。その結果、マクスウェルの悪魔が電子の動きを観測して、その情報を得る際にエネルギーが必要であり、これが電流を流す電源としての役割を果たし、熱力学第二法則を満たすことが分かってきました。この知見は、1ビットの情報を得るためには一定の量のエネルギーが必要であり、逆に1ビットの情報を持っていることにより最大でその量のエネルギーを生み出すことができる、ということの意味しており、情報とエネルギーを結びつけた情報熱力学へと発展しています。情報熱力学は、電子デバイスの電力の下限や、生体中の微小な熱機関におけるエネルギー変換効率と深く関係していることが知られており、これを利用することにより、新たな高効率デバイスの創生につながると期待されます。マクスウェルの悪魔の原理を利用して熱ノイズ

* マクスウェルの悪魔：1867年ごろにイギリスの物理学者マクスウェルが行った思考実験に登場する分子の熱運動を観測して、分子を選び分けることのできる存在。今回は、電子の熱運動（熱ノイズ）を観測して、電子を選び分ける悪魔を実現しました。

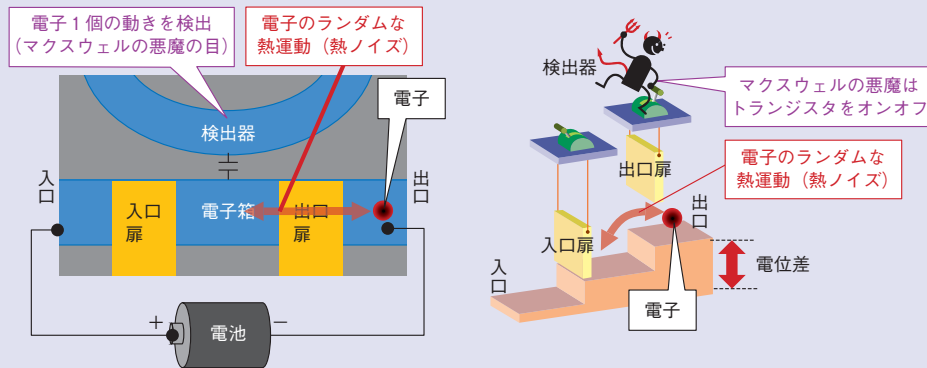


図 デバイス構造

から電力を生成するには、熱運動している電子を正確に観測すること、観測して得た情報を使って電子を選び分けること、そして選り分けた高いエネルギーを持った電子を外部に取り出すことが必要です。しかし、実際にこのようなデバイスを作製することは困難で、これまでの実験的研究は電子を選び分ける段階にとどまっており、電力を取り出すことはできていませんでした。

■研究の成果

今回、NTTは、ナノメートルスケールのシリコントランジスタから成る単電子デバイス(図)を用いて、熱ノイズから電流を生成することに成功しました。生成された電流を使って、別のデバイスを駆動することが可能であり、マクスウェルの悪魔の原理を利用した発電が実現できたといえます。

■行った実験の説明

実験では、2つのナノメートルスケールのシリコントランジスタを用いて形成した電子箱を利用しました。電子箱の入口側と出口側のトランジスタをオン・オフすることで、電子箱の入口側の扉(入口扉)と出口側の扉(出口扉)を別々に開閉することができます。電子箱中の電子数は、その近傍に作製された検出器の抵抗を測定することにより、リアルタイムで検出できます。マクスウェルの悪魔の動作は以下の手順で実現しました。

- ① 入口扉を開けて、入口と電子箱の間における電子のランダムな熱運動を観測する。
- ② 電子が電子箱に入って来たときに、入口扉を閉めて、電子箱に電子を閉じ込める。

③ 出口扉を開けて、電子箱と出口の間における電子のランダムな熱運動を観測する。

④ 電子が電子箱から出て行ったときに、出口扉を閉めて、出口へ電子を追い出す。

この①～④を繰り返して電子を1個ずつ入口から出口に移動させることにより、電流を生成できます。通常、電流は電位差で決まる向きに流れますが、エネルギーの高い電子を選び分けることにより、電位差を登る向きに電流を流すことも可能です。

■技術のポイント：シリコン単電子デバイスの集積化

NTTではこれまでの研究で、ナノメートルスケールの非常に小さな電荷検出器を作製し、室温で電子を1つひとつ検出することに成功しています。また、電子1個を間違いなく閉じ込めておけるシリコントランジスタを作製する技術を利用することで、正確な扉の開閉を実現できます。これらの機能を、1つのシリコン単電子デバイスにまとめあげることで、熱運動する電子を選び分けるマクスウェルの悪魔を実現することができました。

■参考文献

- (1) K. Chida, D. Samarth, K. Nishiguchi, and A. Fujiwara: "Power generator driven by Maxwell's demon," Nature Communications, 2017.

◆問い合わせ先

NTT先端技術総合研究所

広報担当

TEL 046-240-5157 E-mail a-info@lab.ntt.co.jp

URL <http://www.ntt.co.jp/news2017/1705/170516a.html>

ノイズを活かした電子デバイスの実現をめざして

知田 健作

NTT物性科学基礎研究所 ナノデバイス研究グループ 研究員

NTT物性科学基礎研究所では、シリコンナノトランジスタを作製し、電流標準や高感度電荷センサとしての応用をめざした電子1個を操作・検出できるデバイスについて研究しています。デバイスが電子1個のレベルで正確に動作するためにはノイズは排除するべき存在です。ノイズを排除するためにはノイズについて知っている必要がありますが、私たちのデバイスは電子1個の動きを追えるので、電子1個のレベルでノイズを観測でき、それを排除できる可能性があります。私は入社以来、電子1個のレベルでノイズを排除する研究に取り組んできました。電子1個を見て、電子1個の動きに合わせてデバイスを操作する方法で、ノイズを60%以上低減できることを実験で示すことができました。電子1個を観察・操作するこの実験は、マクスウェルの悪魔が行っていることに近いのではないかと考え、関連研究者と議論を重ね、今回の実験方法を考えるに至りました。

今回の実験では、マクスウェルの悪魔を実現するためにノイズを排除するための技術を応用しました。ノイズについて知ることができれば、ノイズを活かすことも殺すこともできます。電子デバイスはノイズを排除することで高速で正確に動作しますが、生体内の分子はノイズを活かしてゆっくりと効率的な動作をしていると考えられています。電子デバイスでも生物に学び、ノイズを活かした、効率的な動作の実現をめざしたいと考えています。

研究者 紹介

