

1 高速電荷センサ

室温において200MHzの動作速度で単一の電子を検出する電荷センサを実現。GHzも視野に。

NTT 物性科学基礎研究所（以下、物性研）フロンティア機能物性研究部 ナノデバイス研究グループでは、シリコンナノ加工技術や新規材料を利用し、従来型のトランジスタでは実現できないような性能や新たな機能を実現する取り組みを進めている。本稿では高速に単一の電子を検出可能な、室温で動作するデバイスの研究開発について紹介する。

単電子の挙動を可視化する
電荷センサの研究開発

電流は電子が集まったものであり、コンピュータが扱う情報の単位であるビットも電子の集まりで表現される。その電子1つ1つの動きを把握することには、基礎物理を理解する上でも重要な意味がある。

「物理現象を把握・理解するためには電流計や電圧計のように物理現象を可視化するツールが必要です。電子1個だからこそわかる現象というものもたくさんあります。こうしたことから、我々は単一の電子（以下、単電子）を検出する電荷センサの研究開発に取り組んできました。」（西口氏）

単電子メモリ／単電子DACの
研究がきっかけの1つに

NTT 研究所で単電子の検出や制御に関する研究が開始されたのは数十年以上前のことであり、その頃に想定していた主要なユースケースは単電子を1ビットとして扱う単電子メモリであった。当時すでに情報処理回路の消費電力が増大し続けることが問題視されていた。そのため単電

子メモリを実現できれば消費電力を大幅に削減できることが研究の大きなモチベーションの1つであった。

単電子メモリを実現するには「単電子を検出する」、「単電子を正確に保存／削除する」、という2つの機能が必要になる。前者は電荷センサそのものだ。

「単電子を転送可能なシリコン・ナノデバイスとして開発し、電荷センサと組み合わせて室温で単電子メモリの基本動作を行うことには、かなり以前から成功しています。ただし近い将来にDRAMやSSDを単電子メモリで置き換えることは難しいと感じています。というのも多数の電子の集合を1ビットとして扱う通常のメモリと異なり、単電子ではエラーを訂正する余地がなく、100%間違いなく動作させる必要があるからです。」（西口氏）

単電子メモリと同様の目的で進められた研究の成果として、単電子DACを挙げるができる。単電子DACとは、文字通り単電子を情報処理信号としてデジタル-アナログ変換を行うデバイスだ。物性研は、2006年に室温で動作する単電子DACを世界で初めて実現している。



NTT 物性科学基礎研究所
フロンティア機能物性研究部
ナノデバイス研究グループ
グループリーダー
特別研究員 西口 克彦氏

この単電子DACにも単電子を検出する機能が実装されている。

物性研は、こうしたデバイスの研究を通じて単電子を検出する機能自体の価値に注目するようになった。それは、今日の電荷センサ研究への注力にもつながっている。

室温における単電子電荷センサの
動作速度が課題に

単電子を検出可能な電荷センサを必要とする分野の1つが、単電子を1ビットとして扱う量子コンピュータだ。量子コンピュータに関する研究の歴史は長く、コンピューティングに必要な速度で単電子を検出する技術も考案されている。しか

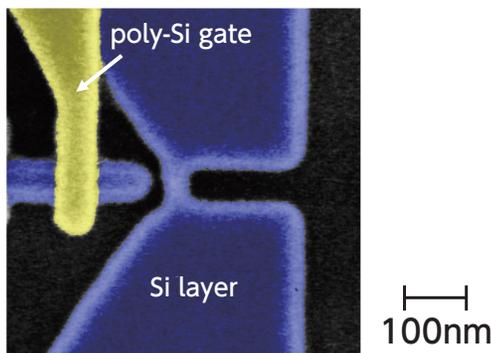


図1 RF 駆動による高速FET センサ

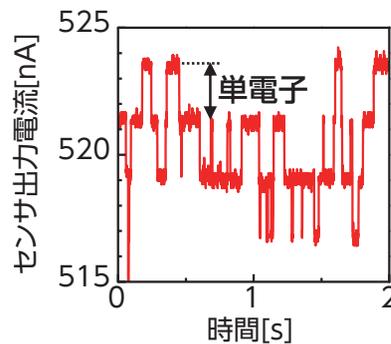


図2 単電子検出時のセンサ出力電流

しそうした技術もマイナス 270 ~ 273°Cのような極低温の環境を必要とするほか、デバイスの製造が容易ではないといったことが実用化に向けた課題となっている。

「量子コンピュータのような用途で求められる MHz や GHz といった速度で単電子を検出するのは、低温の環境下、室温の環境化でそれぞれ異なる難しさがあります。どのような環境でも感度と高速性は相反することが多いからです。我々が取り組んだ室温環境下での検出では、1秒間に電子1個しか検出できないといった動作速度の遅さが特に問題でした。」(西口氏)

室温で高速に単電子を検出可能な電荷センサを実現

微細な電界効果トランジスタ(以下、FET)を高感度な電荷センサとして利用できることは従来から知られていた。物性研はこの仕組みを応用し、数十 nm のチャンネルを持つシリコン FET (図1) を用いることにより、室温で単電子を検出することに成功した(図2)。

ただしそのままでは動作速度の限界が数十 kHz 程度に限られ、コンピュータのように高速な動作を求め

られる用途にはまだ十分ではなかった。そこで FET に LC 共振回路を接続し、高周波信号の反射特性をモニタする手法を用いることにした。これにより動作速度を 20MHz まで向上させることに成功した。

「単電子を検出するような電荷センサは、電池をつなぎ流れる直流電流をモニタすることによって電荷を検出するという動作方法が一般的でした。我々は直流ではなく交流電流を使い、高周波の交流信号をモニタする方式とすることで、動作速度の大幅な向上に成功しました。無線通信の分野において電波を受信し電気信号に変換する際のホモダインやヘテロダインと呼ばれているものと同じような手法です。極低温の環境下では動作実績のある手法ですが、室温で機能させるために独自の工夫が必要でした。室温で単電子を高感度で検出可能な電荷センサとしては、動作速度が世界最高速であるのは間違いありません。」(西口氏)

実用化に適したシリコントランジスタで実装

物性研が開発した電荷センサのもう一つの大きな長が、シリコントランジスタで実装する技術を確立し

た点だ。シリコンを材料とする半導体の製造技術を活用できるため製造が比較的容易であり、さまざまなデバイスへの応用や量産をしやすい。このことは実用化に向け大きなメリットとなる。

「たとえばカメラに利用される CMOS イメージセンサはトランジスタと光センサの組み合わせです。CMOS イメージセンサで光を電荷に置き換え、その電荷を検出することで映像を電気信号に変換しています。室温で単電子を検出できるということは、非常に小さな光信号から発生した非常に小さな電荷も検出できるということです。このため超高感度な光センサの実現に役立つ可能性があります。」(西口氏)

高性能な電荷センサをさまざまな用途に応用

室温でわずかな電荷を高速に検出できるということは、わずかな電流を計測する電流計を実現できることを意味する。そしてわずかな電流を計測できる電流計は、さまざまなセンサの感度を向上させることに役立つ。このため物性研では電荷センサの技術をさまざまな用途に応用することにも取り組んでいる。以下に2

つの例を示す。

IR センサ

応用例の1つが赤外線（以下、IR）センサだ。CMOS イメージセンサが可視光を電気信号へ変換するのに対し、IR センサは赤外線を電気信号へ変換する。シリコントランジスタによる IR センサは性能向上が難しいとされていたが、物性研の高精度な電荷センサ技術を利用することによりシリコントランジスタでも性能向上が可能であることを実証した。試作した IR センサにより、IR 検出感度や波長への依存性を制御できることも確認している。

イオンセンサ

血液に含まれるナトリウムやカリウム、マグネシウムなどのイオンを検出し選別するセンサとして電荷センサを活用できる。

「イオンはあくまでも電荷でしかないので、イオンを検出してもそれがナトリウムイオンなのかカリウムイオンなのかといった選別は不可能だと考えられていました。しかし高速に単電子を検出できる我々の電荷

センサを使うと物質の選別まで可能であることがわかりました。このことも論文で発表済みです。」（西口氏）

200MHz を越え GHz レベルの高速化も視野に

物性研は電荷センサの動作速度をさらに高める研究を続け、LC 共振回路を2つ接続する独自の手法を考案した。この手法による電荷センサで200MHzを越える動作速度を実現（図3）し、今年発表した論文で報告している。

「室温における電荷センサの動作速度を向上させるため、従来は極低温の環境下でも用いられていた技術を応用していました。200MHzを越える高速化を実現した新たな技術は、低温下でも報告例のない完全に独自の技術です。この技術により動作速度をさらに1桁向上し、GHzで動作させることが可能であると考えています。」（西口氏）

さまざまなデバイスの実現に貢献できる技術

室温で高速に単電子を検出できる高感度な電荷センサ技術の活用について、西口氏は次のように述べている。

「我々が開発した電荷センサは単電子の挙動を把握し基礎物理を理解するためのツールとしてだけでなく、高精度な各種センサなど、さまざまなデバイスの実現に利用できます。とはいえ物性研だけでそうしたデバイスを研究開発するのは、体制的にも難しいのが現状です。そこで我々は電荷センサに関する知財を提供する形で貢献したいと考えています。電荷センサを実現するために我々が利用している個々の技術は、シリコン半導体の専門家にとっては難しくない技術ばかりです。さまざまなデバイスに利用してもらえる可能性があると考えています。」

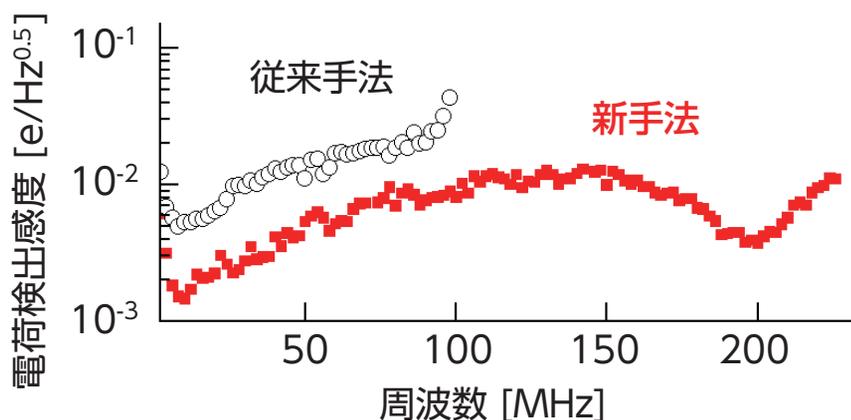


図3 200MHzで単電子の検出を可能に