

## 2 次元層状物質とシリコンの融合デバイス

# 2次元層状物質を組み合わせることでにより 全く新しい特性を持つシリコンデバイスを実現

シリコンと原子1個分の厚さしかないような層状の物質を組み合わせると、シリコンにはなかった特性を持たせることができる。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、このことを利用した新たなデバイスの研究開発に取り組んでいる。

### 2次元層状物質をシリコンナノデバイスに活用

物性研はシリコンを用いて高性能なナノデバイスを実現してきた。シリコンデバイスは製造技術が発達しており実用化しやすいというメリットがある。一方、デバイスにシリコンを超える性能やシリコンにはない特性を持たせることはできない。

「たとえばシリコンは極めて発光しづらい物質であるため、LEDのような発光するシリコンデバイスを実現するのはかなり困難であると考えられています。そこでシリコン以外の物質を組み合わせることで、新たな特性を実現する研究を行っています。」（西口氏）

物質には原子が1層だけ並んでいるような極めて薄い層状にすると、3次元構造の結晶であった際には異なる特性を示すものがある。そのような薄い層状の物質は「2次元層状物質」と呼ばれており、その特性を活かす研究が活発に行われている。物性研がシリコンと組み合わせようとしているのも、この2次元層状物質だ。

### 二硫化モリブデン (MoS<sub>2</sub>) を活用したトンネルダイオード

初期の研究成果の1つが、シリコンと二硫化モリブデン（以下、MoS<sub>2</sub>）を組み合わせて実現した、特殊な電流特性を持つトンネルダイオードだ（図1）。

一般的にダイオードを製造する際はシリコンにさまざまな化合物を不純物として添加し、p型/n型半導体と呼ぶ2つの領域を作り出す。電圧を印加すると2領域の接合面であるpn接合を乗り越えて電子が移動することで電流が流れる。添加する化合物の濃度を極端に高めると電圧に対する電流の特性が大きく変



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

わることを利用したのがトンネルダイオードだ。この特性が高周波の発振回路などに利用されてきた。

1個のモリブデン原子と2個の硫黄原子からなるMoS<sub>2</sub>は、自然界に

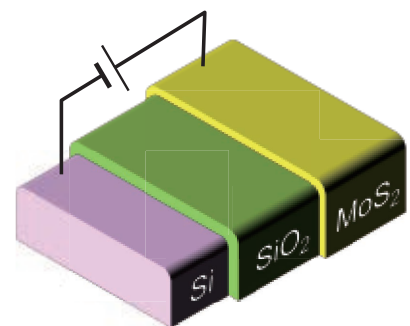
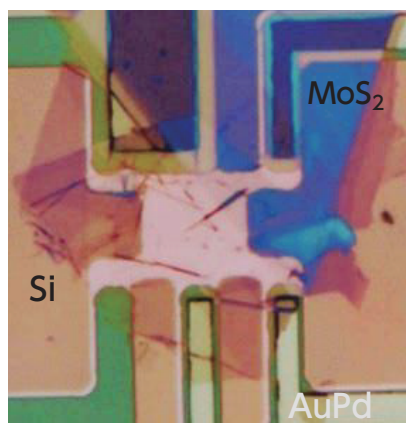


図1 MoS<sub>2</sub>とシリコンによるトンネルダイオード（写真と構造図）

において層状の結晶構造を持った状態で存在する。そして原子1個の厚さの層状にすると3次元構造の状態よりも電気が流れやすくなるという性質がある。物質を削るなどして精度良く原子1層の厚さの層状に加工することは極めて難しいが、MoS<sub>2</sub>は自然界で1層の状態で存在し得るため加工しやすく、さまざまな活用が研究されている。

シリコン層の上にSiO<sub>2</sub>を絶縁体として配置し、さらにMoS<sub>2</sub>の薄膜を貼り合わせて実現した物性研のトンネルダイオードは、従来のトンネルダイオードでは難しい優れた電圧-電流特性を実現している。

「優れた特性を得るには添加する化合物の濃度が均一になり、pn接合の境界が明確であることが重要です。しかし、実際にはどうしてもグラデーションのように濃度の異なる領域ができてしまいます。我々の方式ではそもそも物質が混ざる可能性がないので良好な特性を実現できたと言えます。このような2次元層状物質を組み合わせたシリコンデバイスを提案したのはNTT研究所が初めてでした。」(西口氏)

### グラフェンを活用し電子線の放出を可能に

次に紹介する研究成果は電子を放出するデバイスの実現だ。紫外線を照射するとそのエネルギーによって照射された物質の特性を変化させることができる。このことが殺菌や、粘着テープの粘着質や塗料などを即座に硬化させるといったことに利用されている。紫外線により肌が焼けるのも同じ理屈だ。

電子線は紫外線よりも格段に大き

なエネルギーを持つため、より効率的に物質に作用できる。しかし電子を放出するにはかつて電球に使われていたフィラメントを発光させるような仕組みが必要になる。大きな電流が必要でフィラメントが消耗しやすい。また電子が気体中の物質と反応してしまいやすいため、フィラメントの周囲を真空状態に保つ装置を用意するといった対策が必要であった。

一方、非常に薄い金の膜を用意できれば原理的には一般的な電池レベルの電圧により電子を放出できることが古くから知られている。しかし金を2次元層状物質のように薄く加工することが難しく、実用化されていなかった。そこで物性研が着目したのがグラフェンの活用であった。

「グラフェンは炭素原子1個分の厚さを持つ2次元層状物質です。グラファイト(黒鉛)に粘着テープを貼り付けて剥がすことで簡単に得ることができます。これを金の代わりに使うことで、古くから知られていた原理を応用しようと考えました。構造はトンネルダイオードの例とほぼ同じで、上に載せる物質をMoS<sub>2</sub>からグラフェンに変えただけです。この構造に電圧を印可することで、グラフェンの表面から電子が放出されます。実際に電子線を照射できるデバイスを試作し、動作を確認しました。」(西口氏)

### 多層グラフェン MEMS の機械振動検出

グラフェンを高感度なセンサに利用する研究も行っている。弦のように振動しやすい大きさに加工したグラフェンと電荷センサを組み

合わせ、グラフェンの振動を電気信号に変換するデバイスを開発した。このような構造はMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と呼ばれ、半導体基板上で極小のセンサなどを形成するのに用いられる。身近な例ではスマートフォンのマイクにも利用されている。

感度の良いセンサとして機能するためにはグラフェンが高速に振動することが重要であった。そのためグラフェンを1層ではなく多層の状態にすることで、ある程度の強度を持たせるよう工夫した。

図2左に示すデバイスの構造図上部、白い膜がグラフェンを示している。図2右はこのデバイスを上から撮影した写真であり、グラフェンの下にシリコンによる細いチャンネルが透けて見えるのがわかる。図3にMEMSの振動を検出する回路図、図4に実験で検出したMEMS振動の様子を示す。

「実験では10層のグラフェンを使用し、2020年の時点で200MHz、現在は500MHzでの動作を確認しています。グラフェンを利用したセンサとしては世界最高レベルの速度です。分子などの微細な物質が触れるだけでグラフェンが振動しその信号を検出できるため、超高感度な質量センサやガスセンサの実現に役立つ可能性があると考えています。」(西口氏)

高感度かつ高速なセンサを実現する上では、物性研自身が開発した単一の電子を室温で高速に検出できる電荷センサ(本特集1参照)の技術も重要な役割を果たしている。

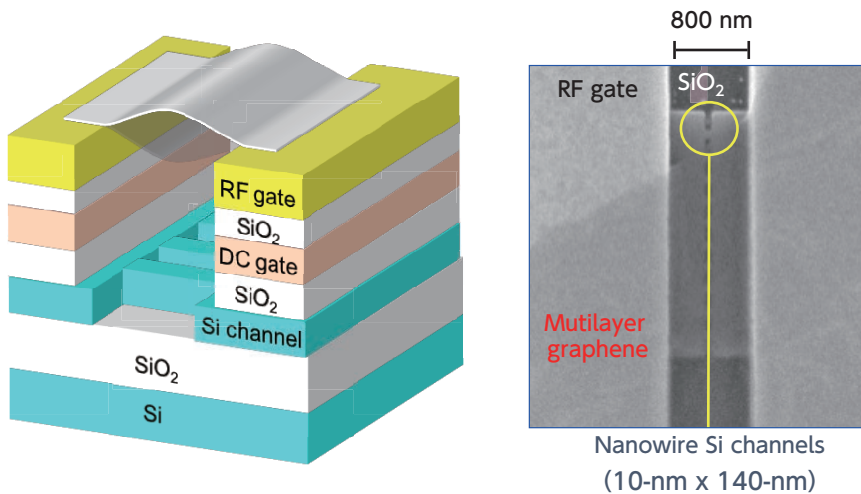


図2 多層グラフェン MEMS の振動を検出するデバイス  
(左：構造図。右：多層グラフェンとシリコン細線によるチャンネルの写真)

## 次の狙いはシリコン LED

紹介してきたような研究を経て現在検討しているのが、グラフェンとシリコンを組み合わせた発光デバイスだ。

「グラフェンをナノメートルサイズのリボン形状にし電気的特性を制御することで、長波長の光を発するシリコンデバイスを実現できる可能性があると考えています。この研究はまだこれからの段階にあるのですが、ユースケースとしてイメージしているのがテラヘルツ発信デバイスで、超高速通信や非破壊検査などへの利用が期待できます。」(西口氏)

## チップレットの高性能化や新たな機能実現に役立つ

2次元層状物質を利用しシリコンデバイスで性能向上や新たな機能を実現することは、情報処理回路の集積化と小型化、消費電力削減などの面で大きな意味がある。

システムに必要な機能を高度に集積化した1つのチップとして実装したものを SoC (System on Chip) と呼んでいるが、近年は機能ごとに回路を分けて製造し、それらをチップ上で接続してシステムを実現する「チップレット」という手法への注目が高まっている。個々の回路の難易度に合わせて適した製造技術を採用できるため、歩留まりや製造コス

トなどの面でメリットがあると言われている。このチップレットは、さらなる集積化のため注目されている積層構造の集積回路にも適していると考えられる。

こうした背景から、2次元層状物質を活用し、シリコンだけでは不可能な性能や機能を持つシリコンナノデバイスを実現する研究活動の意義と期待について、西口氏は次のように述べている。

「チップレット技術を用いて積層構造にすると平面で多数の回路を接続するよりも配線の距離を短くすることができます。情報のやり取りが劇的に早くなるなどのメリットがあるため、この方式がこれからの王道になると考えられています。2次元層状物質を活用してさまざまな機能を持つシリコンのナノデバイスを開発できれば、それらを積層構造のチップレットに接続することで、これまでにはなかったような機能を持つチップレットを実現できるようになると考えています。」

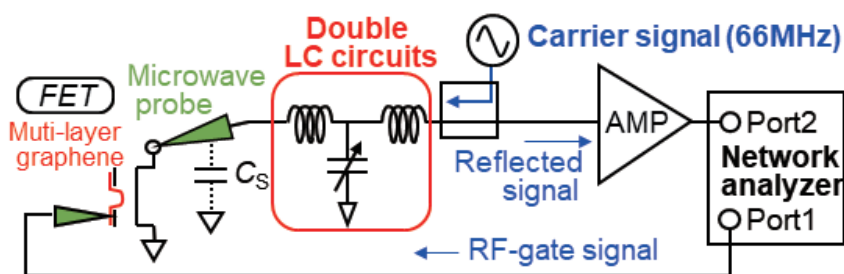


図3 多層グラフェン MEMS の振動を検出する回路

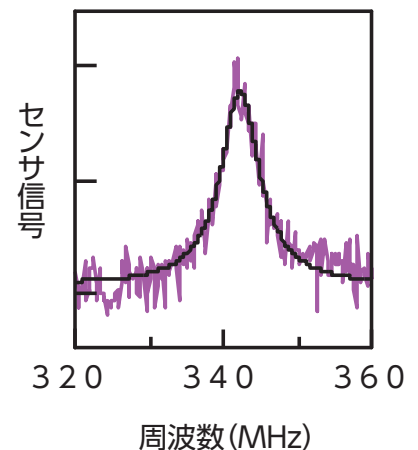


図4 MEMS 振動の検出結果