

二次元層状物質を使った光多値メモリの開発に成功

配布日時：2020年8月24日14時

解禁日時：2020年8月25日19時

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. 物質・材料研究機構（以下 NIMS）は、光と電圧の二つの入力値で複数の値を記録できる多値メモリ素子を開発しました。特に二次元層状物質の積層構造の中に、蓄積する電荷量を光で調整することにより成功しました。本成果は、記録容量の大幅な向上に寄与するだけでなく、光と電子を繋いださまざまな素子に発展することが期待されます。

2. 現代の情報化社会の中で、フラッシュメモリなど情報を記録するメモリ素子が重要な役割を担っています。ここ 20 年で記録密度は大幅に向上しましたが、ますます IoT 化が進む将来に向けて、従来の開発スピードを上回る勢いでデータ処理の高速化や記録容量の大容量化が求められます。しかしシリコンの微細加工技術だけでは大容量化や省電力化に限界が見えてきた今、従来とは異なる動作原理のメモリ素子の開発が求められています。

3. そこで本グループでは二次元層状物質を積層したトランジスタ型のメモリ素子を開発しました。半導体の二硫化レニウム(ReS_2) がトランジスタチャネル、絶縁体の六方晶窒化ホウ素(h-BN)がトンネル絶縁層、グラフェンがフローティングゲートとして機能し、従来のフラッシュメモリと同様に、フローティングゲートに電荷を蓄積することにより情報を記録します(図1)。 ReS_2 は、光で電子と正孔の対を励起させやすく、その数も光の強度で制御可能です。この電子をグラフェン内の正孔と再結合させることで、グラフェン内の電荷量を段階的に減少させることに成功しました。その結果、光と電圧を使い分けながら、電荷の保持量を効率よく多段階に制御した多値メモリの動作を実証できました。さらに主要材料がすべて二次元層状物質であるため、界面が原子レベルで平坦となりリーク電流が低減され省電力化が可能です。

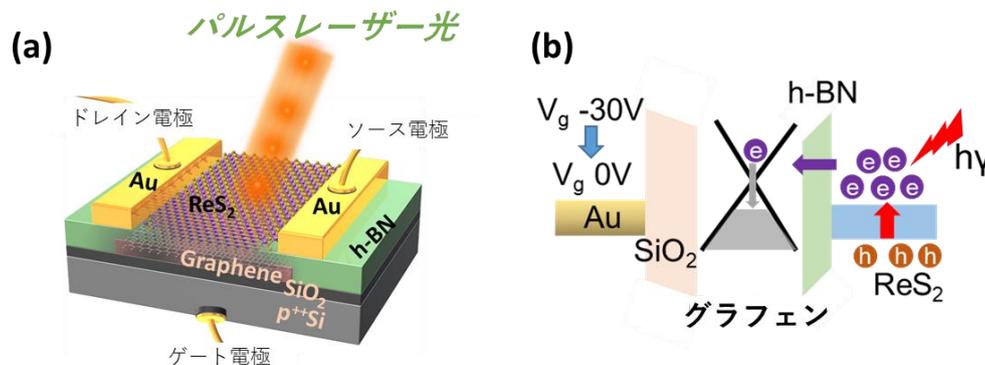


図1(a)素子構造の模式図。グラフェン・h-BN・ ReS_2 を積層し、ソース・ドレイン電極を配線。(b)電荷の蓄積プロセスを説明するバンド構造。電圧と光でグラフェン内に蓄積する電荷量を調整する。

4. 本成果は、記録密度の向上や素子の省電力化に寄与するだけでなく、光と電圧を使い分けて電荷の保持量を制御する仕組みを応用し、光ロジック回路や超高感度光センサーなど様々な展開が期待できます。

5. 本研究は、国際ナノアーキテクニクス研究拠点 量子デバイス工学グループの若山裕グループリーダーおよび Bablu Mukherjee ポスドク研究員と中払周主幹研究員の研究チームによって、科研費特別研究員奨励費「二次元原子層膜を使った超高感度光センサーの開発」の一環として行われました。本研究成果は *Advanced Functional Materials* 誌にて、中央ヨーロッパ時間 2020年8月25日12時（日本時間25日19時）にオンライン掲載されます。

研究の背景

従来の Si を基軸としたエレクトロニクス素子では、微細化の限界と増加の一途をたどる消費電力が課題として指摘され続けています。これまでその課題を克服し続けたのも、実は成熟した Si テクノロジー自身だったのも事実です。しかし近未来の IoT 社会では扱う情報量もその処理速度も桁違いの向上が求められています。記録素子の中心を担ってきたフラッシュメモリ⁽¹⁾も例外ではありません。確かに微細化によって記録密度は向上し続けてきましたが、将来は記録密度に加えて動作速度、信頼性、不揮発性、低消費電力といったいくつもの要因を同時に満たすようなメモリの開発が求められています。

一方、炭素原子層一層で形成されたグラフェンが見出されたとき、その電荷移動度の高さから Si に置き換わる新しい電子材料と成り得るのではないかと期待を集めました。しかしエネルギーギャップのないグラフェンだけでは素子を形成できません。そんな時、同じ二次元層状物質⁽²⁾でありながら半導体として機能する遷移金属カルコゲナイド⁽³⁾、絶縁体として機能する六方晶窒化ホウ素が見出されてから、これらを積み重ねた素子開発が一気に活性化されました。これによりこれまでは難しいとされてきた動作速度・動作電圧・不揮発性といった異なる要因の同時達成ができるのではないかと期待を集めています。

これまで、共有結合で三次元結晶を形成している Si では、微細化が進むにつれて、界面における格子欠陥の影響が大きくなり、特にリーク電流の問題が顕在化してしまいます。そのため消費電力や信頼性に課題がありました。しかし二次元層状物質ではファンデルワールス力⁽⁴⁾で原子層が積み重なっているため、格子欠陥が大幅に低減できることも大きな利点です。これによりこれまでの課題が克服できることが期待されます。

研究内容と成果

今回、物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点の量子デバイス工学グループでは、複数の二次元層状物質を積層したトランジスタを用いて、光と電圧の二つの入力値で複数の値を記録できる多値メモリ素子⁽⁵⁾の開発に成功しました。その素子構造を図 2(a)に示します。

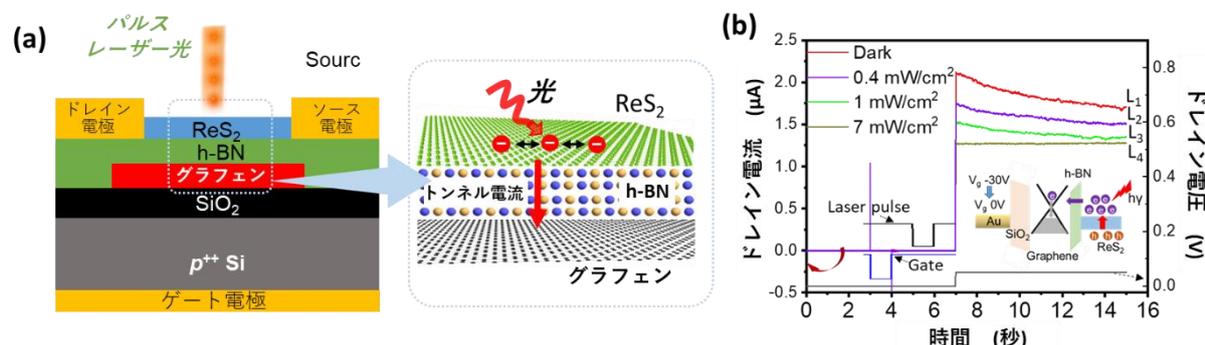
重要なことは素子を構成する主要材料がすべて二次元層状物質で形成されていることです。そのため異なる材料が接する界面は原子層レベルで平坦で、なおかつ格子欠陥が極めて少ないという特長を有します。これらの特長はいずれも駆動電圧の低減や高い信頼性に寄与します。この中ではグラフェンが電荷を蓄積するフローティングゲート⁽⁶⁾として機能します。具体的には、まず短いパルス電圧で一定量の正の電荷(正孔)をグラフェンに蓄積します。このときのドレイン電流量を計測すると図 2(b)の L_1 (赤線)のようになります。次にパルスレーザー光により ReS_2 に電子と正孔の対を励起し、そのうち負の電荷(電子)がグラフェンに注入されます。すると先に蓄積された正孔と再結合し、グラフェン内の蓄積電荷量が減少します。この時、照射する光の強度に依存してドレイン電流量は L_2 、 L_3 、 L_4 と段階的に減少しています。これは電子の注入量が光の強度で制御でき、それが蓄積された電荷量を段階的に制御することに繋がったことを示します。これが 4 つの異なる値を記録できた証左ですが、実際のメモリ素子ではトランジスタの閾値電圧の変化量を読み取ります。

このように光という手段を利用することができたのも、 ReS_2 が直接遷移型半導体⁽⁷⁾であるからです。多くの遷移金属カルコゲナイドは一層だけなら直接遷移型ですが、多層膜になると間接遷移型半導体⁽⁸⁾になってしまうという制限があります。そのため二次元材料の長所と光機能を両立することできません。しかし ReS_2 は層数に係わらず常に直接遷移型半導体であるという特長を有します。その結果、光の吸収と電荷の励起、トランジスタチャネル内での電荷移動、グラフェンへの定量的な電荷注入といったいくつもの過程を同時達成することが可能になりました。もうひとつの特長はボトムゲート型の素子構造としたことです。その結果、チャネルに光を照射することが可能になり、光と電圧を適宜使い分けながら、記録の書込・消去・読込が可能になりました。従来のフラッシュメモリでは素子構造の制限からこのような動作は不可能でした。以上の特長から、単なる記録密度の特性の向上だけでなく、間接遷移型半導体の Si が不得手としてきた光機能との融合も可能になってきました。

今後の展開

蓄積する電荷量を制御すれば多値メモリが可能になるといった提案は、何も今に始まったわけではありません。これを光と電圧の二つの入力値を使って可能にしたことに本研究の意義があります。つまり単に記録密度の向上に資するだけでなく、光機能と融合する道筋を示すことができたことが大きな成果と言えます。その結果、光信号と電気信号を繋ぐ光インターコネクション、電圧と光の二つの入力値で出力値である電流を制御する光ロジック回路、照射した光パルスの個数に従って抵抗値が変化する素子、わずかな

光を感知する超小型高感度光センサーなど様々な応用展開が期待されます。なお今回示した多層構造は転写法と呼ばれる手法で作製しました。高結晶で清浄な異種材料界面を形成することに優れた手法です。今後、この手法を使ってさらなる大面積化ができれば高集積化への道も開けます。



掲載論文

題目：Laser-assisted multilevel non-volatile memory device based on 2D van-der-Waals fewlayer-ReS₂/h-BN/Graphene Heterostructures

著者：Bablu Mukherjee, Amir Zulkefli, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Yutaka Wakayama, Shu Nakaharai

雑誌：Advanced Functional Materials

掲載日時：2020年8月25日19時（中央ヨーロッパ時間25日12時）

DOI：10.1002/adfm.202001688

用語解説

図2(a)メモリ素子の断面模式図。(b)多値メモリ素子の電流特性。パルス電圧とパルス光を印加することによりグラフェンへの蓄積電荷量を制御してメモリ機能を発現する。特に照射するパルス光の強度により電荷蓄積量が制御できるため、L₁からL₄までの四つの値に電流量を制御することができる。

- 1) フラッシュメモリ
トランジスタのゲート絶縁層の中にフローティングゲートといわれる電荷を蓄積する層を持つメモリ。電荷の有無でトランジスタの閾値電圧を変化させることにより、記録の書込・消去・読込を行う。電源を切ってもため込んだ電荷を保持できるため、記録が消えない不揮発性メモリとして機能する。
- 2) 二次元層状物質
共有結合が二次元方向にだけ伸びている結晶材料。原子一層レベルの二次元原子層がファンデルワールス力で積み重なって三次元結晶を形成する。三次元結晶のグラファイトから一層だけの原子層を抽出した炭素の二次元原子膜であるグラフェンが代表例。その他、遷移金属カルコゲナイドや金属酸化物ナノシートなどがある。
- 3) 遷移金属カルコゲナイド
二次元層状物質の一種。遷移金属(Mo, W, Re, V など)とカルコゲン元素(S, Se, Te など)の化合物群。半導体として機能する材料が多く、次世代の電子素子に資する材料として期待されている。
- 4) ファンデルワールス力
結晶を形成するときに原子や分子の間に働く力の一種。電荷を持たない中性の原子(分子)の間に働く双極子相互作用などを起源とした力であり、イオン結合や共有結合と比較して弱い結合。
- 5) 多値メモリ
通常のメモリ素子が(0, 1)の2つの値を記録して、書込・消去・読込するのに対し、(0, 1, 2, ...)といった

3つ以上の値を記録できるメモリ。これにより記録密度を大幅に向上させることができる。

- 6) フローティングゲート (浮遊ゲート)
フラッシュメモリの一部。トランジスタのゲート絶縁膜の中に形成されており、ここに電圧を印加すると電荷を蓄積することができる。この電荷の蓄積・放出により記録の書込・消去を実行する。他の構成部と電氣的に絶縁(浮遊)されているため、一度電荷が蓄積されると電圧をかけなくてもそのまま電荷が保持され続けるため、記録は消えることがない。
- 7) 直接遷移型・間接遷移型半導体
半導体材料の中で、伝導帯の底と価電子帯の頂上と同じ波数空間に位置するものが直接遷移型、異なるものが間接遷移型。直接遷移型では運動量の変化無しに電子・ホールを励起と再結合ができるため光の吸収や発光が効率よく引き起こされる。Siは間接遷移型。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 量子デバイス工学グループ

主幹研究員 中払 周 (なかはらい しゅう)

E-mail: NAKAHARAI.Shu@nims.go.jp

TEL: 03-6734-4100(内線 4178)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 量子デバイス工学グループ

副拠点長・グループリーダー 若山 裕 (わかやま ゆたか)

E-mail: WAKAYAMA.Yutaka@nims.go.jp

TEL: 029-860-4403

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp