2023 年 2 月 10 日

報道解禁制限あり【2 月 10 日 17 時 5 分 解禁】

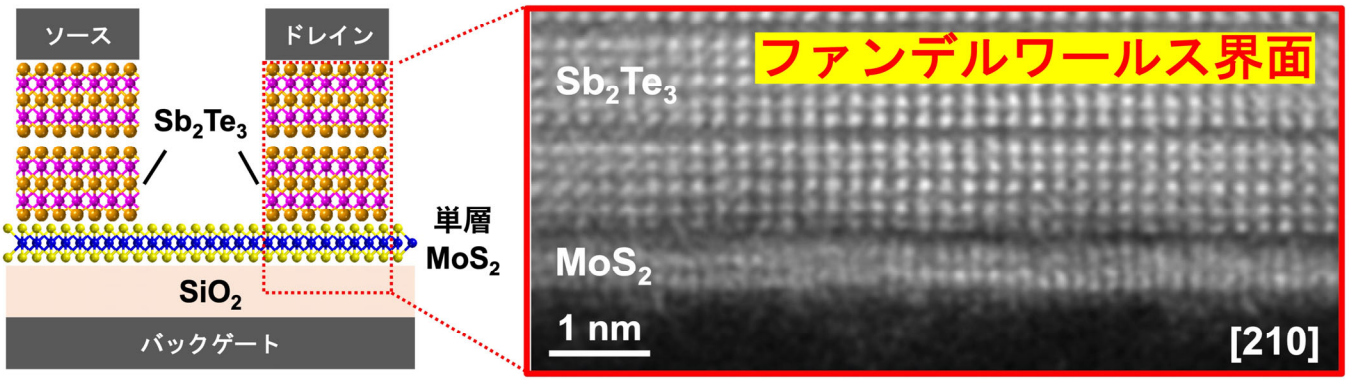
国立研究開発法人 産業技術総合研究所／東京都立大学

ロジック半導体の性能向上の鍵となるトランジスタ材料を開発

2 次元材料 MoS_2 と層状 Sb_2Te_3 での低コンタクト抵抗の実現

ポイント

- スパッタリング法で、原子レベルで制御された Sb_2Te_3 層状物質を形成
- MoS_2 との異種層状物質界面(ファンデルワールス界面)形成で低コンタクト抵抗を実現
- 耐熱性があり量産も見込め、次世代 CMOS デバイスの実現に貢献



低コンタクト抵抗を有する MoS_2 トランジスタ
（左）トランジスタの模式図、（右）Sb_2Te_3/MoS_2 界面を拡大した TEM 画像

※原論文「Sb_2Te_3/MoS_2 van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance」の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示 4.0 国際）

概 要

国立研究開発法人 産業技術総合研究所（以下「産総研」という）デバイス技術研究部門 張 文馨(Chang Wen Hsin) 主任研究員、畑山 祥吾 産総研特別研究員、齊藤 雄太 研究グループ付、岡田 直也 主任研究員、入沢 寿史 研究グループ付らは、東京都立大学 宮田 耕充 准教授と共同で三テルル化二アンチモン（Sb_2Te_3）/二硫化モリブデン（MoS_2）のファンデルワールス界面の作製に成功し、n 型 MoS_2 トランジスタ性能向上に大きく貢献する接触界面抵抗の低減（低コンタクト抵抗）技術を開発しました。

MoS_2 は、2 次元結晶構造を有する遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)と呼ばれる材料であり、次世代トランジスタのチャネル用半導体材料として非常に注目されています。しかしながら、一般的な金属電極と MoS_2 接触面の高いコンタクト抵抗がトランジスタ高性能化の妨げとなっていました。今回、MoS_2 上に層状物質 Sb_2Te_3 を成膜することで、トランジスタのコンタクト抵抗を大幅に低減することに成功しました。また、Sb_2Te_3 の高い熱安定性により、作製した MoS_2 トランジスタは半導体製造工程に対して十分な耐熱性を示すことが期待できます。今回開発した技術は、MoS_2 トランジスタにおけるコンタクト抵抗の課題を根本的に解決できる可能性を秘めており、次世代ロジック半導体として期待される 2 次元材料トランジスタの高性能化に大きく貢献します。

なお、本研究の詳細は、2023 年 2 月 10 日（中央ヨーロッパ時間）にエレクトロニクスに関連した材料を取り扱う国際学術誌「*Advanced Electronic Materials*」に掲載されます。 **下線部は【用語解説】参照**

開発の社会的背景

先端 CMOS 製造技術において、電力効率や性能、面積、コスト「PPAC(Power efficiency, Performance, Area, Cost)」を改善し続けていくためには、単に大きさを小さくするだけではなく、新しい材料やデバイス構造を導入する必要があります。この技術的取り組みのなか、現行のシリコン(Si)においてはナノシート構造が提案され、2 nm 世代の技術として期待が持たれています。さらにその先の Beyond 2 nm 技術についても、経済産業省の半導体・デジタル産業戦略検討会議において、開発の強化が言及されています。Beyond 2 nm 技術の一つとして、適度なバンドギャップを保ちつつ、化学的に安定な層状構造を有し、原子層厚において Si よりも優れた半導体特性を示す 2 次元 TMDC 材料のトランジスタへの導入が期待されています。しかしながら、2 次元材料トランジスタの実用化を実現するためには技術的に克服すべき課題が多く残されており、世界中の研究機関・企業で研究が盛んに行われてきました。

研究の経緯

TMDC は 1 nm 以下の原子層領域においても高い導電性が維持できるという観点から、次世代トランジスタのチャネル材料として大きく注目されています。産総研では、国立研究開発法人科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST）「原子層ヘテロ構造デバイスの実証と 3 次元集積 LSI のための原子層成膜プロセスの開発(2017～2021 年度): 都立大との共同実施」プロジェクトにて高性能 TMDC トランジスタの研究を実施してきました。従来の TMDC トランジスタ開発では、主にタングステン(W)、チタン(Ti)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)、パラジウム(Pd)、金(Au)などの金属電極が用いられてきました。しかしながら、これらの金属電極と TMDC との界面は高いコンタクト抵抗を示すために、TMDC トランジスタの駆動電流が抑制され、デバイス性能が向上しないことが知られていました。これは、金属電極/TMDC 接合界面でフェルミ準位のピンニング現象(FLP)が起こり、界面の電位障壁を低減することが困難であるためです。最近、半導体メーカーや研究機関を中心に、FLP を解消するような TMDC のコンタクト形成技術についての開発が進められています。TSMC や Intel より、ビスマス(Bi)やアンチモン(Sb)といった半金属をコンタクト材料として用いることで、コンタクト抵抗が大幅に低減することが報告されています。しかし、Bi は融点が低く(約 270 °C)、熱的安定性が低いことから、400 °C以上の耐熱性が要求される半導体製造工程への適用は困難と考えられています。そのため、次世代トランジスタの高性能化に向けて、耐熱性が高くかつ TMDC とのコンタクト抵抗を低減するような電極材料の開発が求められています。

なお、本研究開発は、JST CREST、JST FOREST プロジェクトおよび JSPS 科研費による支援を受けています。

研究の内容

本研究では、代表的な TMDC の一つである MoS_2 を用いたトランジスタを作製し、そのコンタクト材料として Sb_2Te_3 に着目しました。Sb_2Te_3 は、多数の原子が層状になっており、層同士はファンデルワールス力という弱い結合で結びついています。また、Sb_2Te_3 は、Bi や Sb のように半金属に似た特性（狭バンドギャップ：0.2–0.3 eV）を示します。さらに、Sb_2Te_3 の融点(約 620 °C)は Bi 等に比べて高いことが知られています。これらの特徴は、Sb_2Te_3 が同じく層状物質である MoS_2 との間にファンデルワールス界面を形成し、FLP を抑制する可能性があることを示

唆するものです。このため、Sb_2Te_3 を利用することで、高い耐熱性を維持したまま低コンタクト抵抗を実現できると考えました。産総研のグループは、これまでの Sb_2Te_3 の長い研究で、基板や下地材料表面に平行に層状物質を形成するノウハウを蓄積してきました。そこで、今回、量産化に適したスパッタリング法を駆使して単層 MoS_2 上に Sb_2Te_3 を成膜し、Sb_2Te_3/MoS_2 の接触界面にファンデルワールス界面が形成されることを透過電子顕微鏡(TEM)によって確認しました。図 1 に Sb_2Te_3/MoS_2 積層膜構造の TEM 断面写真図および対応する原子配列を示します。Sb_2Te_3 および MoS_2 は両方とも良好な結晶性を持つ層状構造になっていることがわかりました。Sb_2Te_3/MoS_2 の TEM 写真は、二つの材料の原子配列が一致していることを示しており、これらの積層膜がファンデルワールス界面を有することを確認しました。

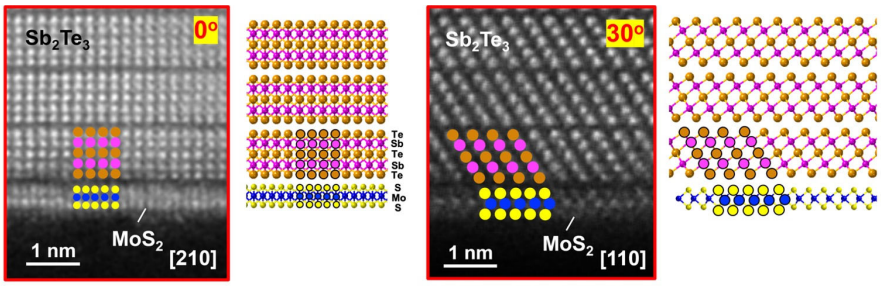


図 1 Sb_2Te_3/MoS_2 界面の断面電子顕微鏡(TEM)写真および対応する原子配列

※原論文「Sb_2Te_3/MoS_2 van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance」の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示 4.0 国際）

一般的に、集積回路の配線工程では 400 °C以上の耐熱性が実用化の重要な要件となります。そこで、Sb_2Te_3/MoS_2 積層膜構造の耐熱性を調べました。熱処理前後に、MoS_2 単層構造を維持していることを、ラマン分光法を用いた分析により確認しました。また、断面 TEM 写真（図 2）より、Sb_2Te_3/MoS_2 積層膜構造は 450 °Cの熱処理を経ても良好な結晶性とファンデルワールス界面を維持していることを明らかにしました。

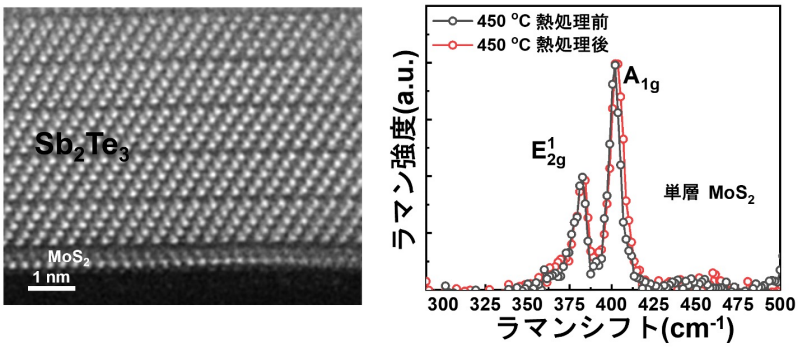


図 2 450 °C熱処理後 Sb_2Te_3/MoS_2 断面の電子顕微鏡写真およびラマンスペクトル

※原論文「Sb_2Te_3/MoS_2 van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance」の図を引用・改変したものを使用しています。クリエイティブ・コモンズ・ライセンス（表示 4.0 国際）

Sb_2Te_3/MoS_2 ファンデルワールス界面形成がトランジスタ特性にどのような影響を与えるかを調べました。図 3 に MoS_2 トランジスタの電流電圧特性の比較を示します。n 型トランジスタ動作を示しつつ、Sb や、Ni、W をコンタクト材料として使用した場合と比べて、Sb_2Te_3 電極を有するトランジスタの駆動電流は 4～30 倍にも向上するこ

とがわかりました。このような大幅な駆動電流の増大はコンタクト抵抗の低減が主要因であると考え、実際に MoS_2 トランジスタのコンタクト抵抗を求めた結果を図 4 に示します。Sb_2Te_3 電極を有するトランジスタのコンタクト抵抗値は、Sb 電極を使用した場合のそれと比べて 1 桁程度低く、また、これまでの世界最小の報告である Bi 電極を使用した場合のコンタクト抵抗値とも遜色のない値であることがわかりました。Sb や Bi 電極は半導体製造の後工程の高温に耐えないため、半導体デバイスへの使用には適しません。Sb_2Te_3 電極は 400 °C以上の耐熱性を示しつつ、Bi 電極に匹敵する低いコンタクト抵抗値を実現しており、これを両立したという報告は世界でも本研究が初となります。

以上のように、Sb_2Te_3/MoS_2 界面において低コンタクト抵抗と半導体製造工程に必要な耐熱性が両立できる技術を開発しました。この技術は、Beyond 2 nm 世代のロジック半導体の実現に寄与するものとなります。

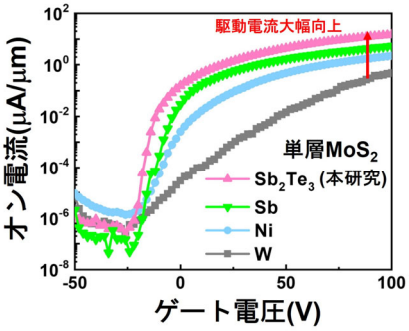


図 3 電流電圧特性の比較

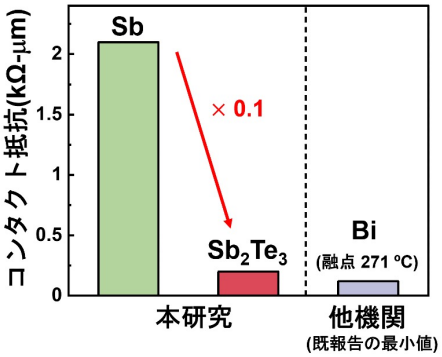


図 4 コンタクト抵抗の比較

今後の予定

今後は、n 型と p 型の TMDC トランジスタを直列につないだ CMOS を作製することを目指します。そのためにも、n 型 MoS_2 トランジスタだけでなく、p 型 TMDC トランジスタにおける低コンタクト抵抗技術の開発が求められます。今回開発した Sb_2Te_3 コンタクト技術は、n 型 MoS_2 に対して最適な特性を示しましたが、p 型 TMDC には別のコンタクト材料が必要となります。既存の Si の性能をはるかに超えた次世代ロジック半導体の実現に向けて、低コンタクト抵抗を有する TMDC による CMOS の開発を加速していく計画です。

論文情報

掲載誌：Advanced Electronic Materials
論文タイトル：Sb_2Te_3/MoS_2 van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance
著者：Wen Hsin Chang*, Shogo Hatayama, Yuta Saito*, Naoya Okada, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, and Toshifumi Irisawa*
DOI：10.1002/aelm.202201091

用語解説

ファンデルワールス界面

結合力の弱いファンデルワールス力によって結びついた層状結晶同士の界面。原子レベルで平たんな理想的界面で、化学結合が終端しているため、異種材料同士の組み合わせでも界面における欠陥を限りなく減少することができる。

トランジスタ

半導体結晶内の電子や正孔による電気伝導を利用して、電流の増幅などを行う素子。半導体基板上に、酸化膜を介してゲート電極を形成し、その両側にソース、ドレイン電極を形成した構造を電界効果トランジスタという。電気伝導の担い手が電子であるものを n 型トランジスタ、正孔であるものを p 型トランジスタという。

遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)

遷移金属ダイカルコゲナイド(Transition Metal DiChalcogenide, TMDC)は化学式が MX_2(M は遷移金属、X はカルコゲン元素である S(硫黄)、Se(セレン)、Te(テルル))と示される物質群である。X-M-X という三原子層を構成ユニットとし、それぞれのユニットがファンデルワールス力で弱く結びついた層状の結晶構造を示すものが多い。

チャネル

半導体チャネルを指す。トランジスタのソース電極とドレイン電極間の電流経路であり、半導体材料(Si、Ge、TMDC など)で構成する。

層状物質

共有結合やイオン結合のような強い結合により構成されている単位層が、主に弱いファンデルワールス力を介して積層した層状の結晶構造を持つ物質群。代表的な層状物質として黒鉛（グラファイト）などがある。

ロジック半導体

LSI 用半導体素子は主に「ロジック演算用」と「メモリ用」に分類される。スマートフォンやパソコンに搭載され、電子機器の制御やデータ処理の役割を担う、演算用半導体素子。

CMOS

Complementary Metal-Oxide-Semiconductor（相補型金属-酸化膜-半導体)の略。電流-電圧特性が反対の符号を示す n 型トランジスタと p 型トランジスタを直列につないだ素子。低消費電力で集積回路の処理を行うための最も基本的なデバイスである。

ナノシート

トランジスタにおいて電流のオン・オフをつかさどるチャネル構造の一種。エッチング技術により、半導体をナノメートルレベルの厚さの二次元的なシート状に加工したもの。ナノシートトランジスタは、寸法を縮小してもゲート制御性が優れており、電流駆動力が大きいといった特徴を持つ。

2 nm 世代

世界的に定められている半導体のロードマップにおける半導体製造工程の技術世代の呼び名。22 nm 世代のあたりから技術世代の呼び名と実際の半導体微細加工寸法の乖離が始まっており、2 nm の呼称も配線幅や最小加工寸法等の実際のサイズを指すものではない。

半導体・デジタル産業戦略検討会議

半導体・デジタル産業の競争力を高める目的で、関連の有識者や省庁が集まり、今後の政策の方向性について情報共有、意見交換を行う会議。

出典：https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital.html

バンドギャップ

半導体の分野においては、電子が占有されている最もエネルギーが高い状態から、電子が占有されていない最も低いエネルギーの状態までのエネルギーの差を指す。代表的な半導体である Si は、バンドギャプは 1.1 eV 程度である。

フェルミ準位のピンニング現象(FLP)

半導体において電子の占有確率が 50%になるエネルギー準位（フェルミ準位）が、半導体／金属界面で決まった位置に固定(=ピンニング)されている状態。ピンは画鋲が一点で固定するように、エネルギーの値もある一定値に決まってしまうことを指している。理想的な界面においては、金属の種類を変えることでフェルミ準位の位置を変化させることが可能となる。現実の界面では、界面準位のためにフェルミ準位のピンニングが起こる。

半金属

物理的、化学的特性が金属と非金属の中間に位置している物質である。明確な定義はなく文脈によって意味が異なることがあるが、一般的には金属は光沢があり、電気伝導性を示し、加工すると延性や展性を示すが、非金属は、電気はあまり通さず、加工するとほとんど延性は示さないものが多い。半金属はそういった特性がおおむね中間くらいの性質を示す。本研究では、電気の伝導性という観点で、金属ほど高い伝導性を示すわけではないが、非金属ほど電気が流れない物質ではないという意味合いで用いている。

スパッタリング法

金属や酸化物、その他多くの物質の薄膜を形成するための成膜技術の一種。真空チャンバー内に薄膜としてつけたい材料をターゲットとして設置し、高電圧をかけてイオン化させたアルゴンや窒素を衝突させ、ターゲット表面の原子をはじき飛ばすことで、基板に成膜する方法である。物理蒸着法(Physical Vapor Deposition, PVD)の一種。

透過電子顕微鏡(TEM)

薄膜化した試料へ加速した電子線を照射し、透過した電子線を結像する顕微鏡である。原子レベルの観察が可能である。

ラマン分光法

光が物質に入射して分子と相互作用すると、入射光と異なった波長をもつ光（=ラマン散乱光）が発生する。分子や結晶の種類によって散乱される光の波長が異なるため、幅広い波長で測定することで、物質に関する構造情報を調べることができる手法である。

本件に関する問い合わせ先

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

デバイス技術研究部門 先端 CMOS 技術研究グループ

主任研究員　張 文馨

〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

029-849-1148　　wh-chang@aist.go.jp

デバイス技術研究部門 システマティックマテリアルズデザイングループ

研究グループ付　齊藤 雄太

〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

029-861-8013　　yuta-saito@aist.go.jp

機関情報

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

https://www.aist.go.jp/

広報部　報道室　hodo-ml@aist.go.jp

東京都立大学

https://www.tmu.ac.jp/

東京都立大学管理部　企画広報課 広報係　info@jmj.tmu.ac.jp

配布先

経済産業記者会｜経済産業省ペンクラブ｜中小企業庁ペンクラブ｜資源記者クラブ｜文部科学記者会｜科学記者会｜筑波研究学園都市記者会｜鳥栖市政記者会｜福岡経済記者クラブ｜PR TIMES