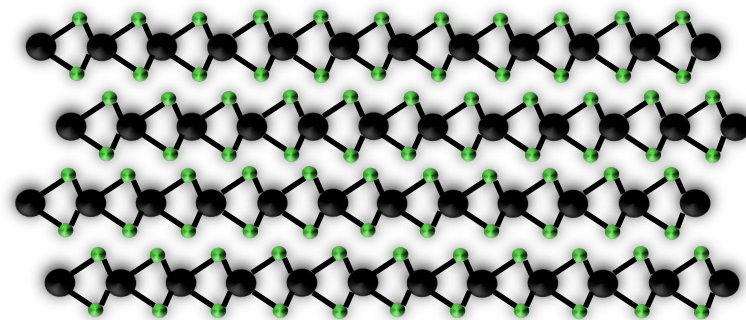


2D層状物質のスパッタ法による 堆積とCMOS化技術の開発



日本大学 生産工学部 電気電子工学科
教授 清水 耕作

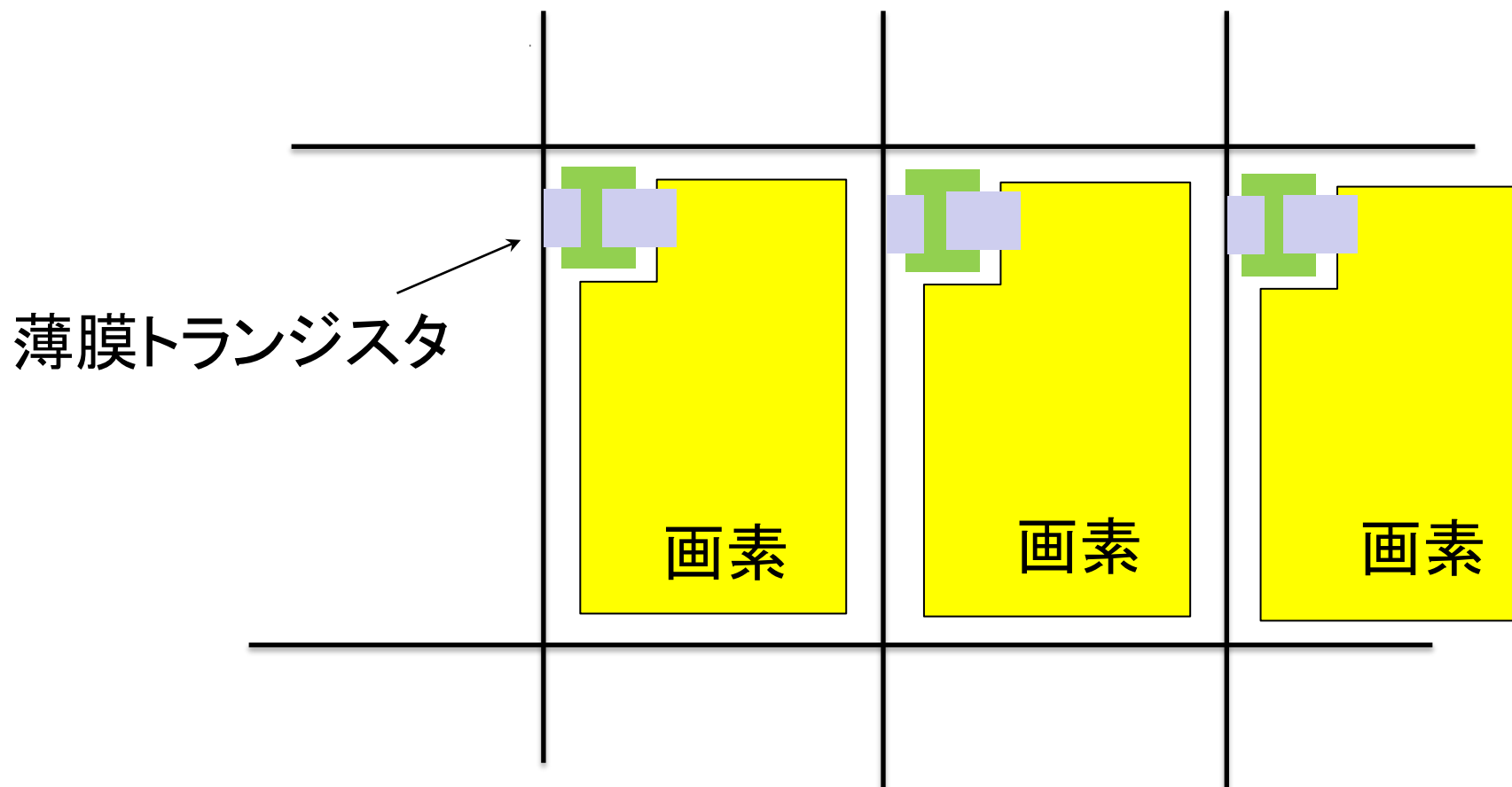
2024年12月24日

技術の背景

液晶ディスプレイや有機ELなどの表示装置には、薄膜トランジスタが必要。

→ 画素のスイッチとして。

高精細にするには小さくて高性能なトランジスタへの要請が高まっている。



技術の背景

求められる性能

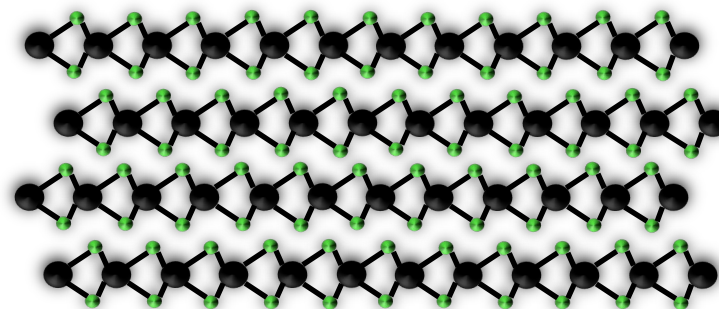
安価（材料コスト、プロセス数、歩留まり）
大面積（製膜方法、簡易プロセス）

これまで時代を牽引してきた材料

1990年代 アモルファスシリコン

2010年代 IGZO、ITZO

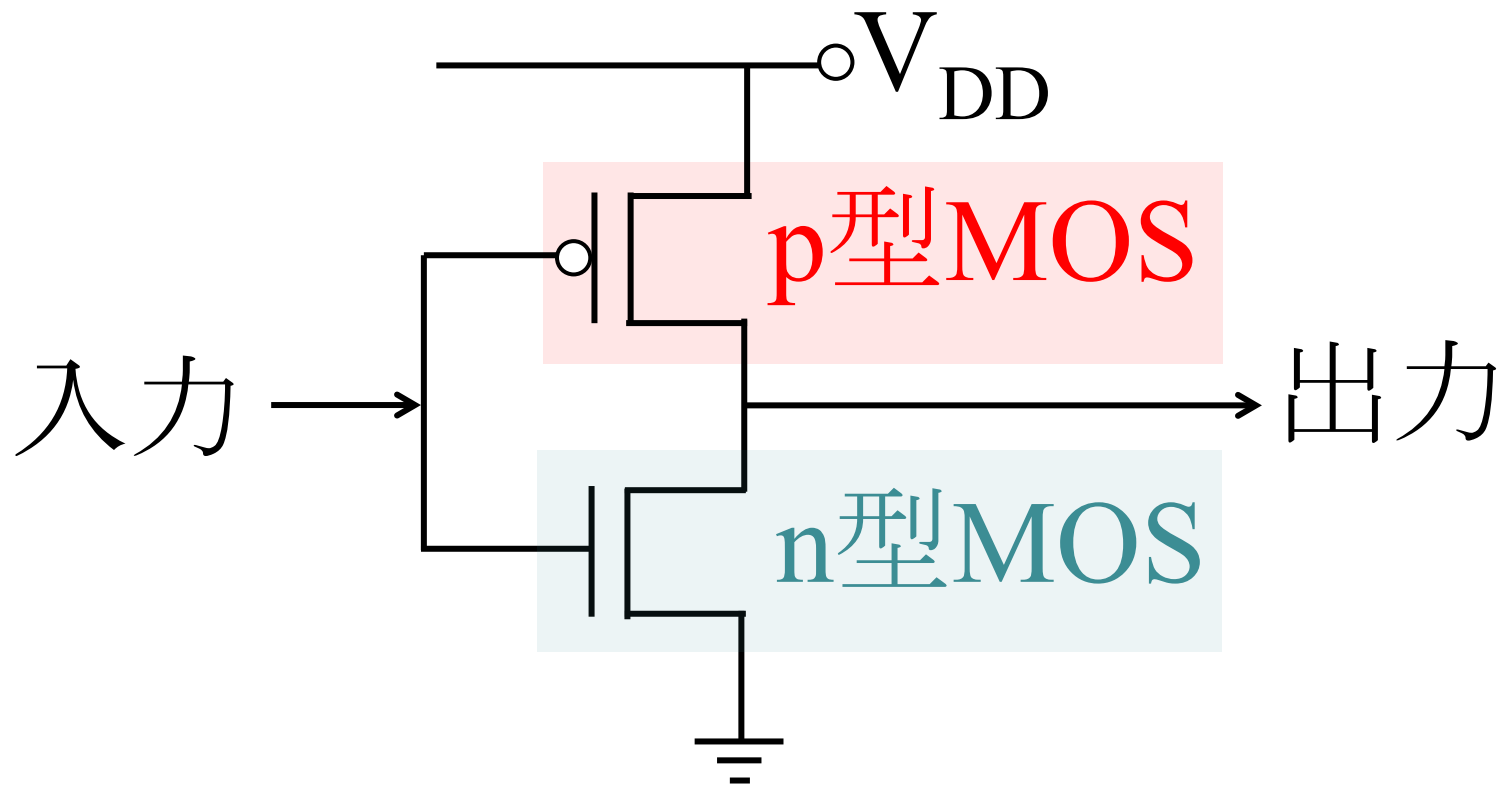
2020年代 **層状材料？**



二次元層状物質

従来の技術とその問題点

さらに高性能化・省電力化するにはCMOSが必要。
これまでのトランジスタは、n型のみ。



インバータ回路の例

従来技術との比較

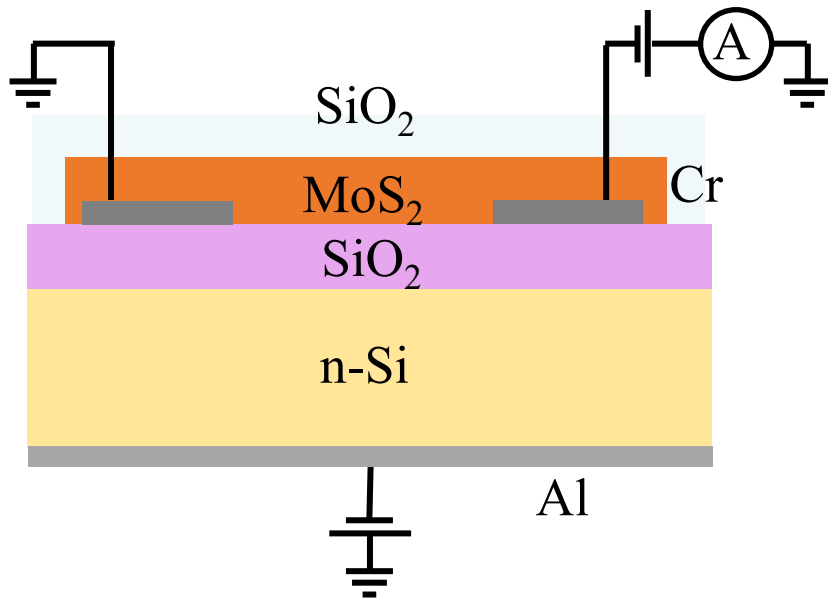
ITZO、IGZOに代表される酸化物半導体では、高性能のn型TFTはトランジスタが作製できる。

p型材料は、多くなく広く用いられるには至っていない。

MoS₂に代表される層状半導体では、n型TFTのみならずp型TFTの高性能のトランジスタが容易に作製できる。

トランジスタの作製とプロセス

素子構造



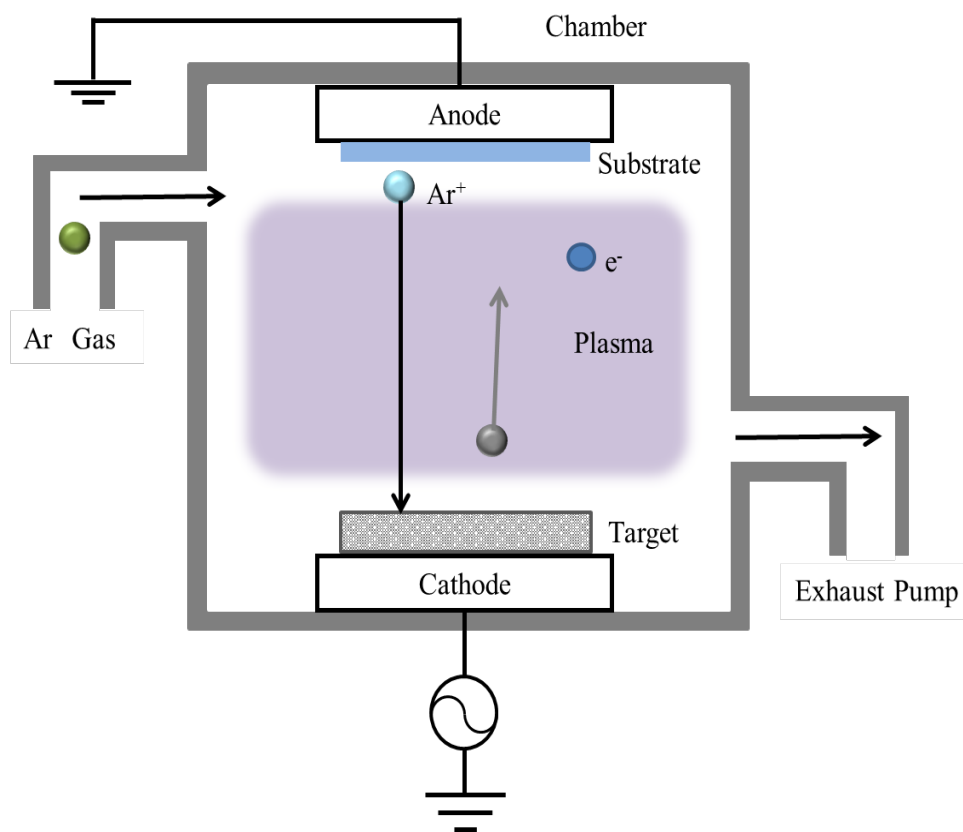
素子作製工程

- ソースドレイン電極の形成
- MoS₂ 堆積
- 保護膜作製
- ゲート電極作製

課題を解決をする手段

薄膜作製方法

大面積に製膜できる

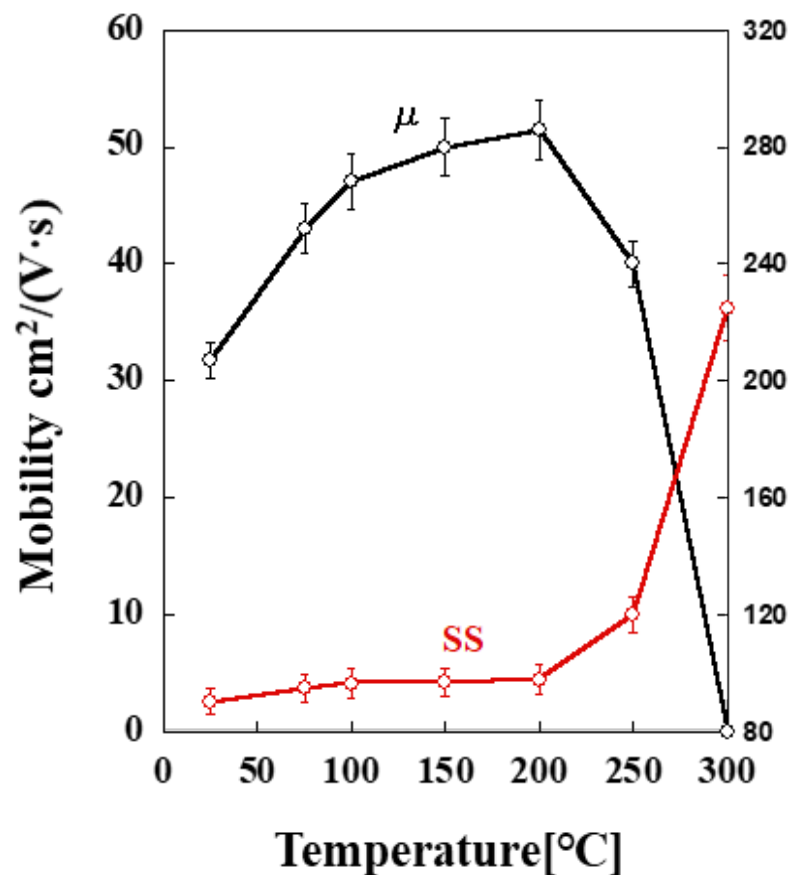


- ・スパッタ法は毒ガスを使わない。
- ・環境負荷を伴わない。

実験的考察

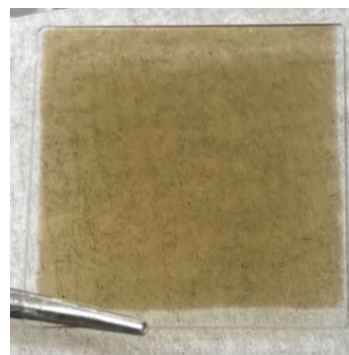
アニールによる特性の改善と問題点

移動度のアニール温度依存性

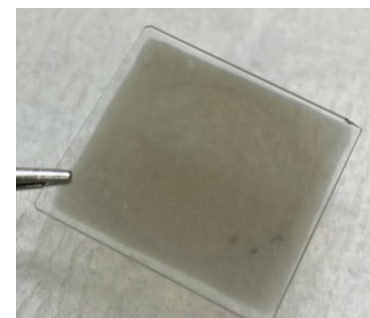


Subthreshold swing [mV/dec.]

| | 移動度 μ [cm^2/Vs] | SS値 [mV/dec] |
|--------|---------------------------------------|--------------|
| asdepo | 31.76 | 90.3 |
| 100°C | 48.02 | 96.5 |
| 200°C | 51.42 | 97.9 |
| 300°C | 0.032 | 225 |



ガラス基板上に成膜したMoS₂

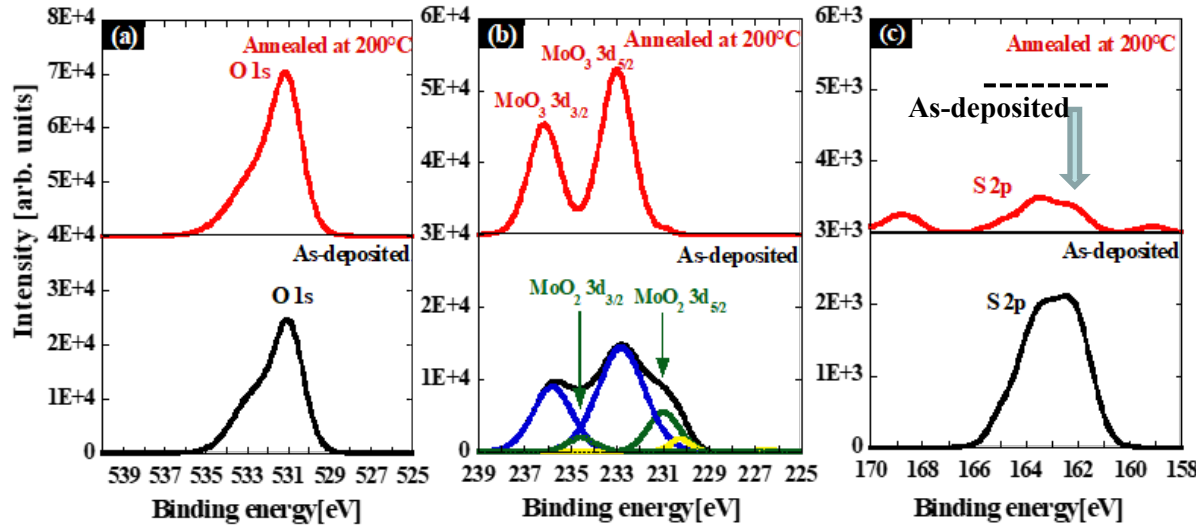


300°Cの加熱をしたMoS₂

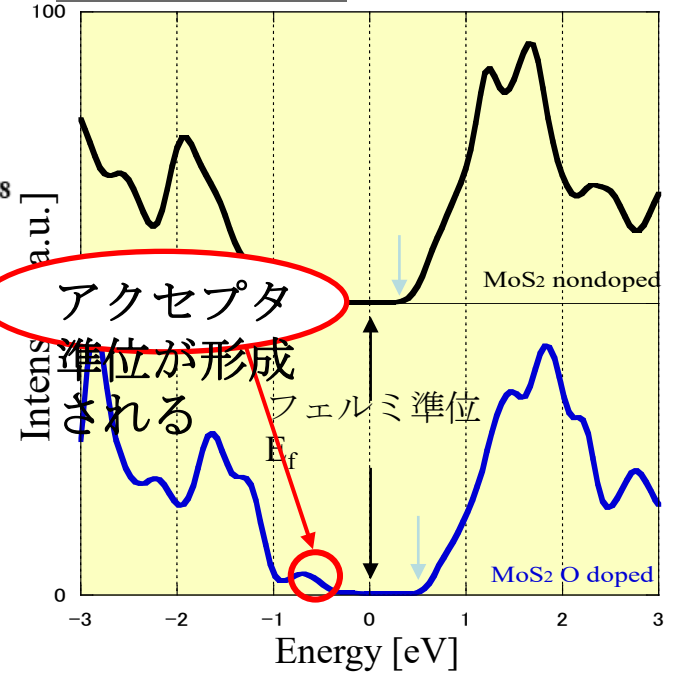
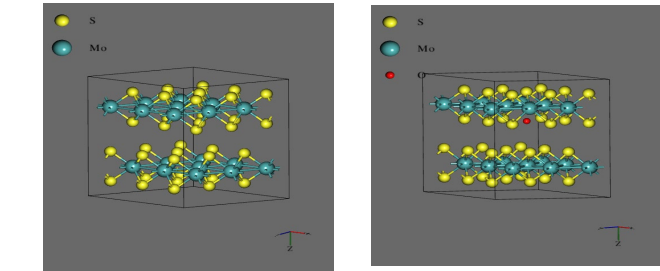
200°Cを超えないアニール（熱処理）は設備も簡単。

これまでの検討結果

アニール前後のXPS



第一原理計算



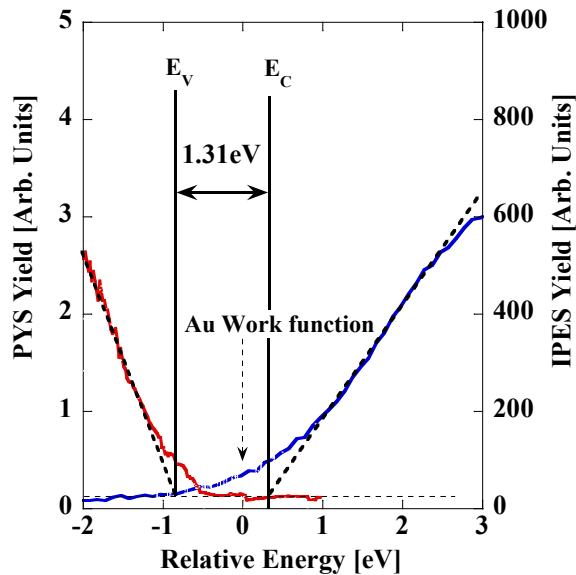
アクセプタ
準位が形成
される

フェルミ準位

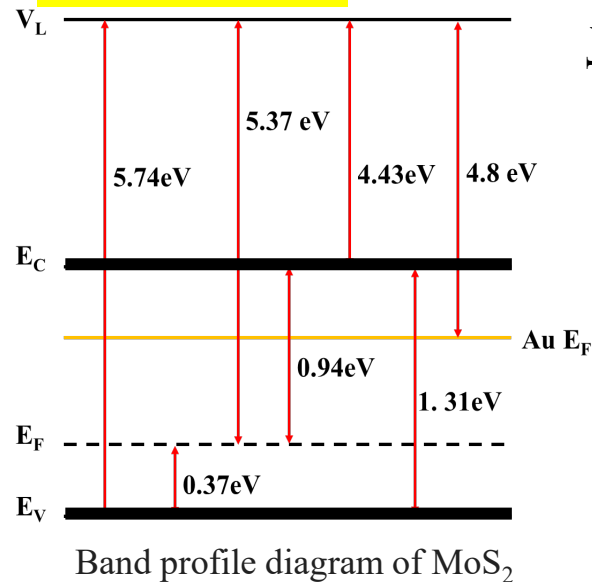
E_F

MoS₂ O doped

PYS KP IPESの結果

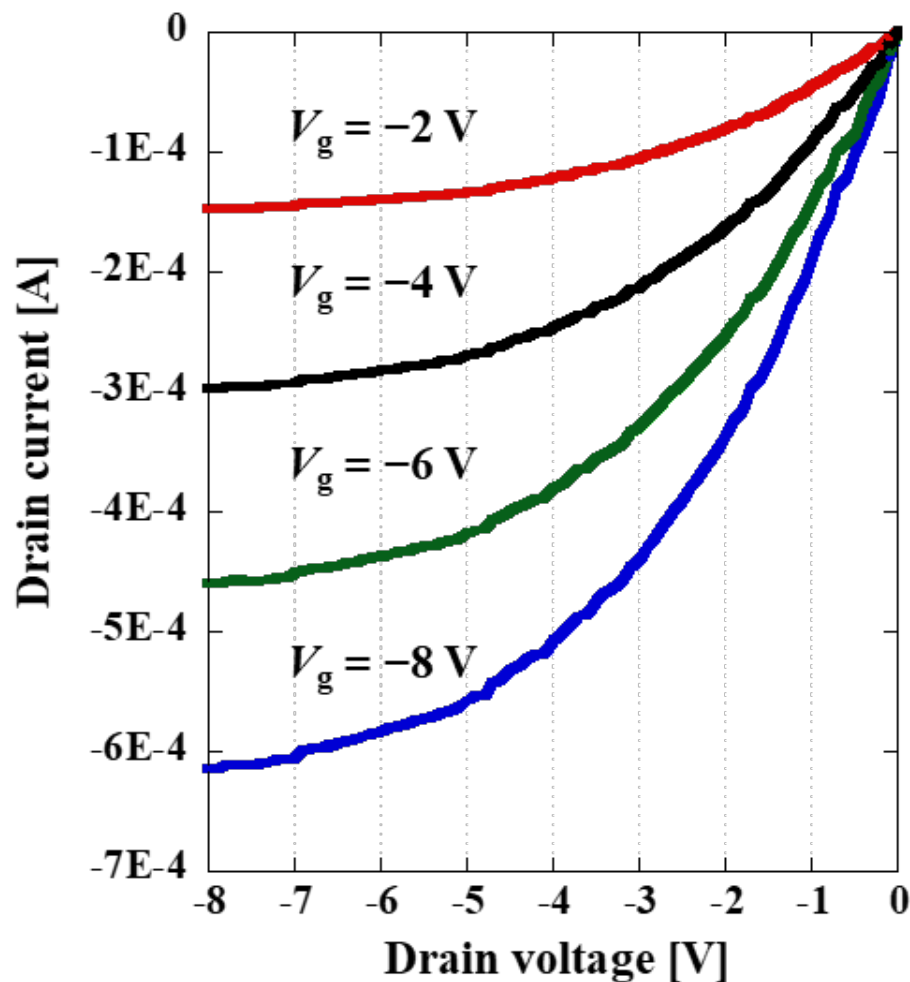
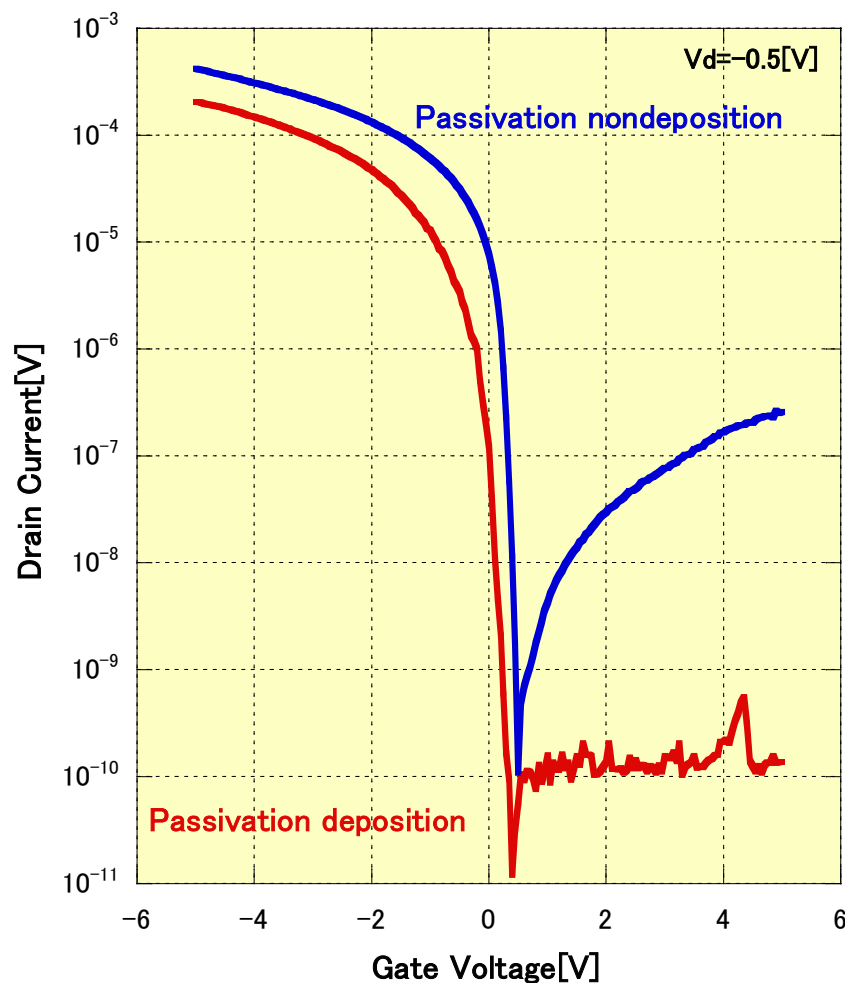


バンドプロファイル



Oをドーピングすると価電子帯側に
アクセプタ準位が形成される

フェルミ準位がp型へシフトする



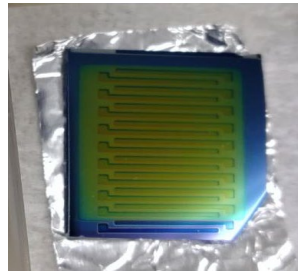
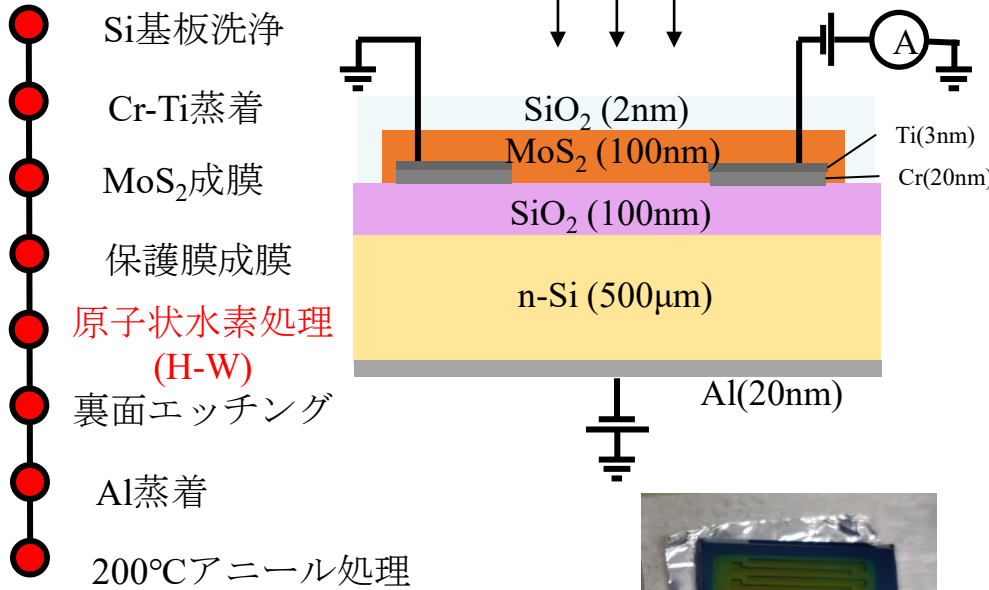
硫化アニールを施したMoS₂の伝達および出力特性

李、清水、 “スパッタ法で作製したp型硫化モリブデン薄膜の特性と薄膜トランジスタへの応用” , 「材料」 Vol. 73, No. 9, pp. 735-742, Sep. 2024

成果

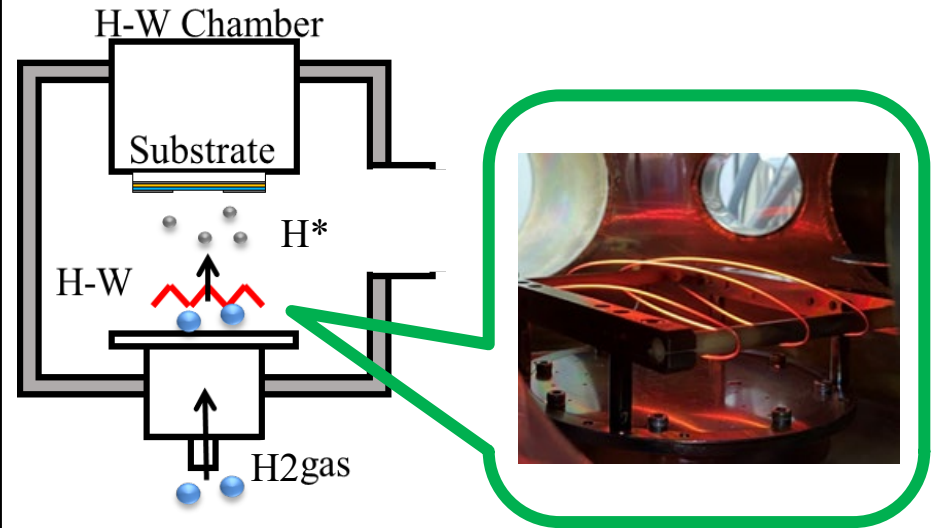
素子構造及び水素化条件

TFTの成膜工程



Si基板上にMoS₂を成膜した素子

H-Wによる原子状水素処理の機構

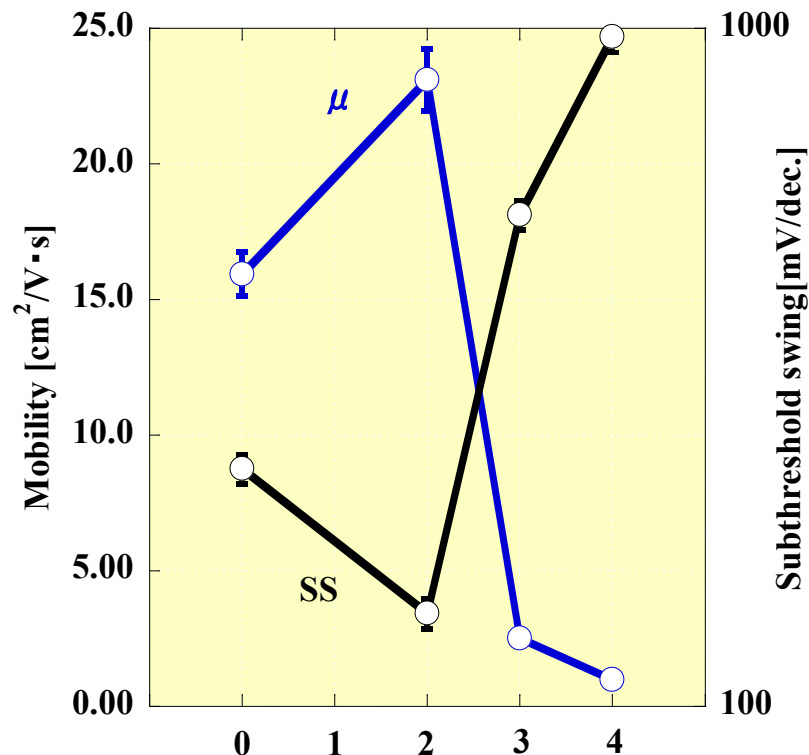
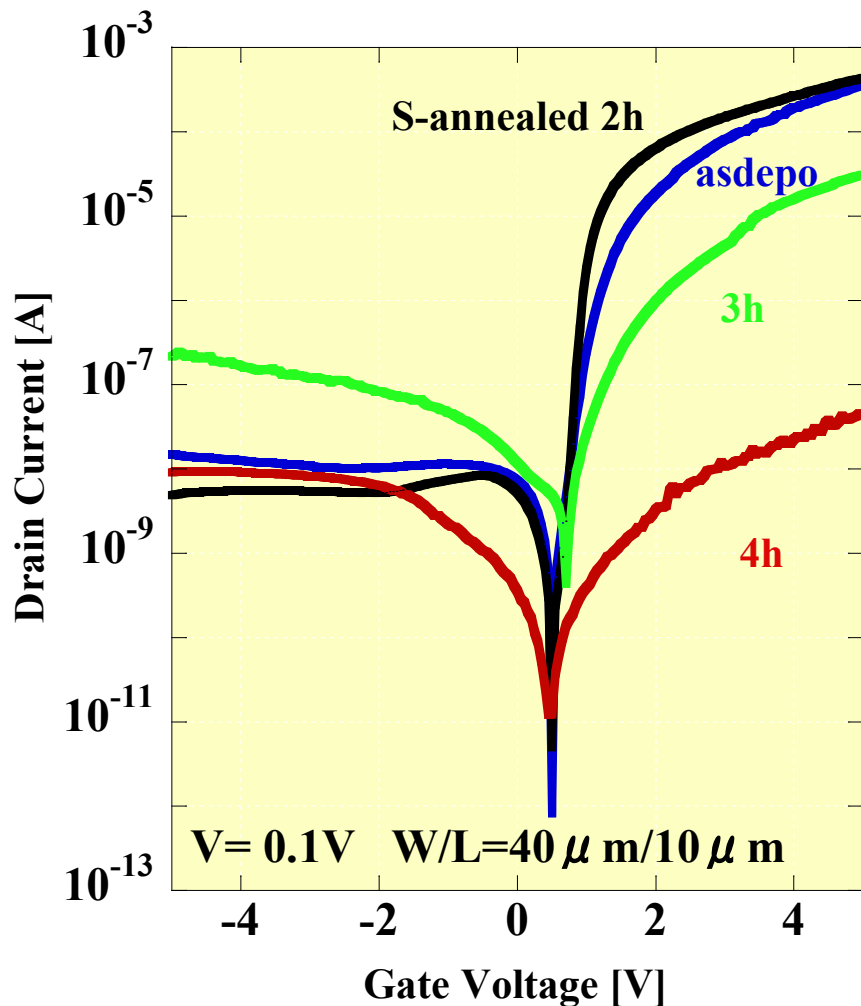


| | | |
|----------------------------|----------------|-----|
| Gas flow rate [sccm] | H ₂ | 5 |
| Pressure [Pa] | | 10 |
| Substrate distance [mm] | | 20 |
| Substrate Temperature [°C] | | 26 |
| Duration time [min] | | 6 |
| Hot-Wire Temperature [°C] | | 800 |

水素化処理後の硫化アニール処理条件の検討

移動度とSS値

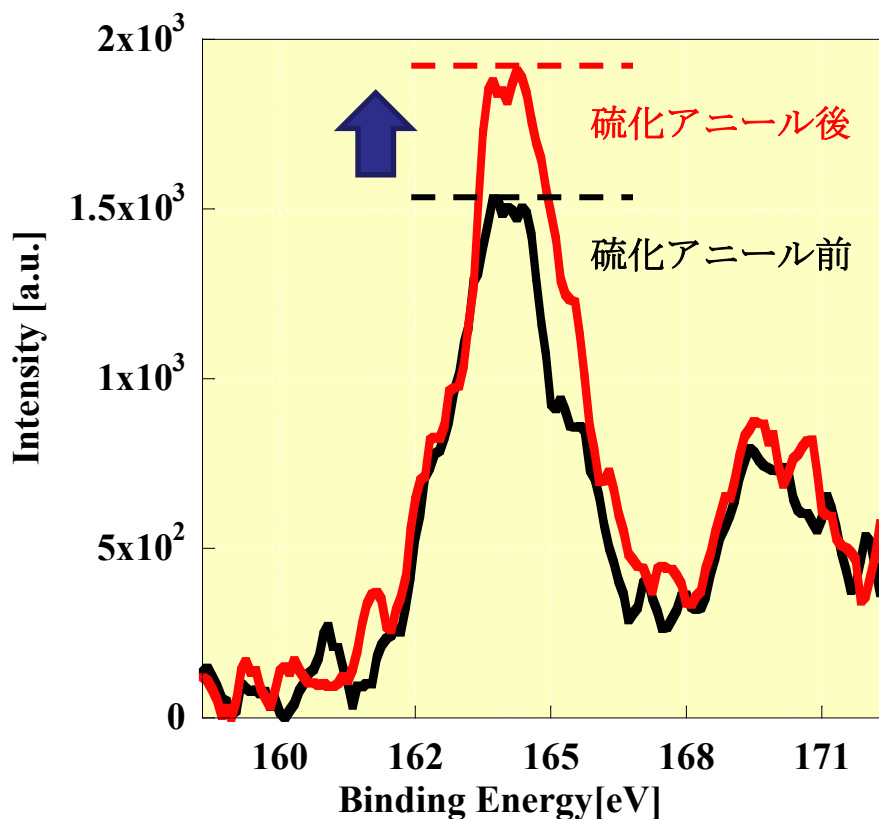
硫化処理の伝達特性



| 処理時間 [h] | 移動度 [cm^2/Vs] | SS値 [mV/dec] |
|------------|-------------------|--------------|
| Asdepo | 15.95 | 224.3 |
| 2 | 23.11 | 137.2 |
| 3 | 2.51 | 531.1 |
| 4 | 0.01 | 971.5 |

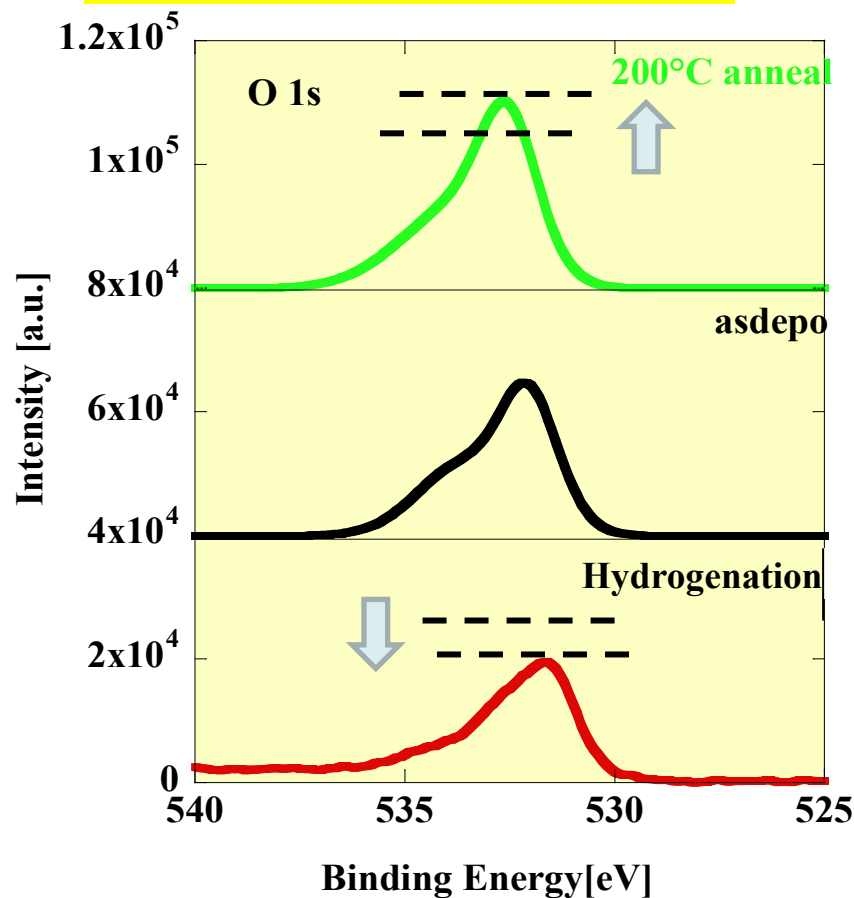
各処理を施したMoS₂のXPS

硫化処理を施した前後の硫黄のXPS



硫黄補填により、
硫黄の量を増加した

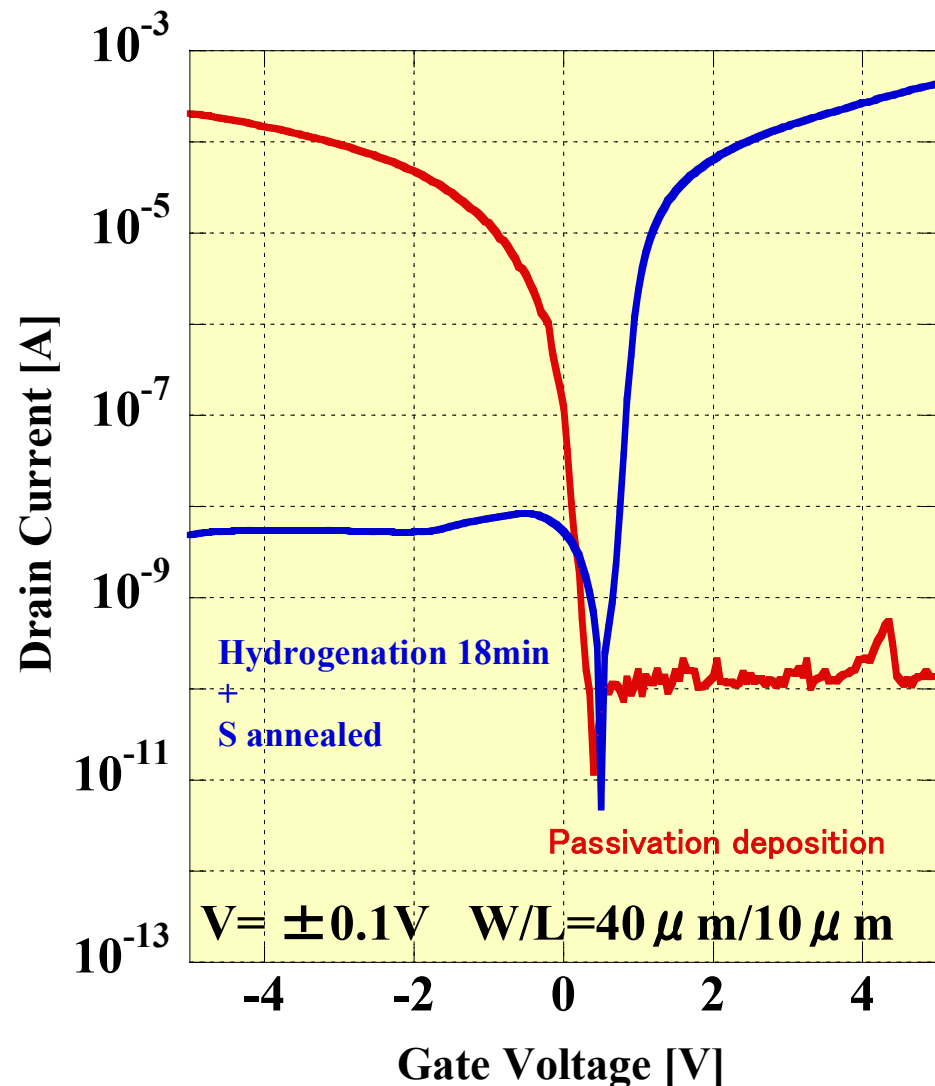
各手法を施した膜中の酸素のXPS



水素化処理を施したMoS₂が
酸素の量を減少した

目標とする用途

スマートフォン、タブレットなどの
LCD,OLED用高精細画像機器、太陽電池



P型 MoS₂

| 評価項目 | 値 |
|---------------------------|------------------------|
| 移動度 [cm ² /Vs] | 12.09 |
| SS値 [mV/dec] | 193.3 |
| しきい値 [V] | 0.37 |
| OFF電流 [A] | 1.37×10^{-10} |

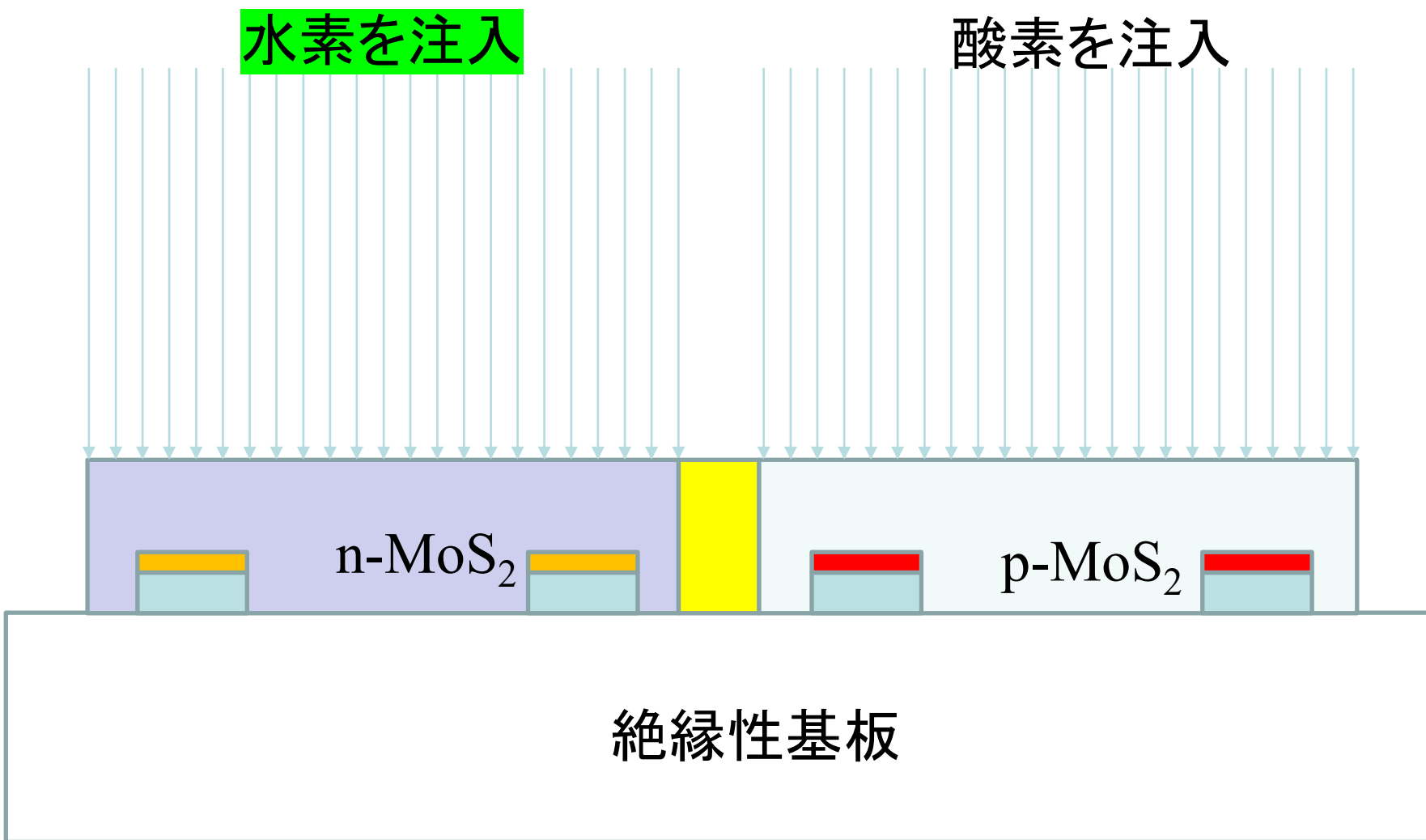
N型 MoS₂

| 評価項目 | 値 |
|---------------------------|-----------------------|
| 移動度 [cm ² /Vs] | 15.95 |
| SS値 [mV/dec] | 137.8 |
| しきい値 [V] | 1.13 |
| OFF電流 [A] | 4.84×10^{-9} |

原子状水素処理を施したMoS₂の伝達特性

これまでと違う新しいアプローチ

半導体のイオン注入によってp, n制御する。



従来技術とその問題点

既に実用化されているものには、In-Ga-Zn-O, In-Su-Zn-Oが主流を占めているが、

- ・ 対応する p 型材料が少ない、
- ・ 電圧印加時の光照射によるしきい電圧変化がある、

等の問題があり、利用範囲は限定されている。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、n型トランジスタしかできない材料をp型、n型両方を作製することができる材料を開発することに成功した。
- 従来はディスプレイの画素にのみの使用に限られていたが、移動度が平均して $40\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上にまで性能が向上できたため、積極的に利用することで装置のダウンサイズ化が可能となった。
- 本技術の適用により、周辺回路が同時に作製できるため、製造コストが $1/5\sim 1/10$ 程度まで削減できることが期待される。

想定される用途

- 本技術の特徴を活かすためには、携帯電話、P C画面の製造に適用することで高精細な画像を提供することができる。
- 上記以外に、CMOSを用いた駆動回路が得られることも期待される。
- また、達成されたCMOSに着目すると、ディスプレイの周辺回路やメモリ回路といった分野や用途に展開することも可能と考えている。

実用化に向けた課題

- 現在、CMOSについて、特性の制御、出力が可能なところまで開発済み。しかし、安定性、信頼性の点が未着手である。
- 今後、信頼性について実験データを取得し、デバイスに適用していく場合の条件設定を行っていく。
- 実用化に向けて、p型およびn型トランジスタ特性を移動度 $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上まで安定的に製造できるよう技術を確立する必要がある。

企業への期待

- 未解決のOFF電流・界面制御については、イオン注入技術により克服できると考えている。
現在共同研究中の日新イオン機器（株）が強い味方となってくれる。
- 製膜技術、プロセス技術を持つ、企業との共同研究を強く希望。
- また、ディスプレイを開発中の企業、太陽電池分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と考えている。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は大規模な設備投資が不要なため、容易に技術移管ができる。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行ったり、新しい構造を採用することでさらに高性能化できる。
- 本格導入にあたっての技術指導や実用化に向けた検討を同時に進行できる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 薄膜トランジスタの製造方法、相補型金属酸化膜半導体の製造方法、薄膜トランジスタ及び相補型金属酸化膜半導体
- 出願番号 : 特願2024-094264
- 出願人 : 学校法人日本大学
- 発明者 : 清水 耕作

産学連携の経歴

- 2009年-2011年 F社と共同研究実施
「無機発光材料を用いた波長変換太陽電池の開発」
- 2011年-2013年 D社と共同研究実施
「有機波長変換太陽電池の開発」
- 2012年-2015年 産業振興公社との共同研究実施
「新エネルギープロジェクト」
- 2012年-2015年 I社と共同研究実施
「酸化物半導体ITZOの高性能化」
- 2015年-2018年 S社と共同研究実施
「酸化物半導体IGOの高性能化」
- 2021年-現在 T社と共同研究
「商業ビル内におけるエネルギーの管理と有効利用」
- 2024年-現在 日新イオン機器（株）との共同研究
「二硫化モリブデン薄膜の高性能化・高信頼化を目指したイオン注入応用の検討」

お問い合わせ先

日本大学産官学連携知財センター

T E L 03-5275-8139

F A X 03-5275-8328

E-mail nubic@nihon-u.ac.jp