

同時発表：  
筑波研究学園都市記者会（資料配布）  
文部科学記者会（資料配布）  
科学記者会（資料配布）



## 安定した特性を有する新元素構成による酸化膜半導体の開発に成功

～高精細フラットパネルの安定的な生産が可能な新元素構成酸化膜～

平成 25 年 9 月 20 日

独立行政法人物質・材料研究機構

### 概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（拠点長：青野 正和）の相川 慎也 ポスドク研究員、塚越 一仁 主任研究者、生田目 俊秀 統括マネージャーは、次世代のディスプレイを駆動するためのカギとなる画素スイッチング半導体<sup>1)</sup>を、新元素構成の酸化膜を用いて開発しました。
2. フラットパネルディスプレイ<sup>2)</sup>は、現代の情報化社会において、機械の中で使われる電子ビット情報を人が認識できるように表示する重要なインターフェースです。従来は、アモルファスシリコン薄膜やポリシリコン薄膜<sup>3)</sup>を使ってテレビやスマートフォンの画素スイッチの電界効果トランジスタ<sup>4)</sup>が造られていましたが、高精細化や高速動作化による高特性の半導体膜開発が強く求められています。現時点では、インジウム、ガリウム、亜鉛の混合酸化膜(IGZO)トランジスタは、電界効果移動度が高く有力な酸化膜半導体です。しかし、一般に高特性の酸化膜半導体を安定して効率的に生産する製造条件の調整が難しく、実際の生産での大きな問題となっており、薄膜形成には製造条件がより広い材料が開発されることが望まれます。
3. 我々は、酸化インジウムに、酸化した金属（酸化チタン、酸化タングステンあるいは酸化シリコン等）を極微量添加し、薄膜が半導体として動作するための製膜条件の範囲を決める要因を初めて見出しました。酸化膜が“結合かい離エネルギー<sup>5)</sup>”の小さな金属を含むと、酸素が薄膜から容易に離脱もしくは吸着して膜の伝導性が変わってしまいます。たとえば、亜鉛は結合かい離エネルギーが極めて小さく、膜の加熱冷却に際して酸素が容易に離脱もしくは吸着します。この知見は、結合かい離エネルギーに着目すれば、酸化膜半導体の製造条件を制御できることを示唆しています。実際に、酸化インジウムに結合かい離エネルギーの高い酸化シリコンを添加すると、製膜条件を広げることが出来ることを確認しました。製膜後の熱処理におきましても、薄膜の伝導性の安定化を確認しました。
4. 今回の成果は、急激に普及が進んでいるスマートフォンでの電力の約半分近くを消費<sup>6)</sup>するディスプレイの低消費電力化に有効だけでなく、テレビの高精細化のための高周波数化に有効な技術<sup>7)</sup>として期待されます。さらに、本研究で開発した薄膜では、広く亜鉛メッキ鋼板やゴムの加硫剤として多量に使われる“元素枯渇が心配なる亜鉛”や、高価なガリウムを使わないことで、貴重な資源を保全するだけでなく、激しい原料価格変動に惑わされずにフラットパネルディスプレイを製造できるようになります。
5. 本研究は、近日中に米国応用物理誌 *Applied Physics Letters* 電子版に公開される予定です。

## 研究の社会的背景

近年、フラットパネルの高精細化や多機能化に伴って、ディスプレイ部分で消費される電力が急増している。ディスプレイで消費される電力が増大すると、モバイル通信機器の連続使用時間が短くなり、スマートフォンやタブレットにおいては、数時間程度の間隔で頻繁に充電をしなければならない。スマートフォンなどモバイル端末の出荷台数は益々増加しており、省電力化に向けた技術開発は喫緊の課題である。モバイル機器だけでなく、テレビでさえも高精細化のためのフレームスキャン高速化のために、画素を制御するスイッチングトランジスタの高速化が求められ、現行のアモルファスシリコンでは次世代高精細テレビを造るのが困難である。

この問題を解決する材料として、IGZO（酸化インジウム、酸化ガリウムおよび酸化亜鉛の混合物）薄膜が開発され、現在、IGZO を搭載したスマートフォンが市場に出回っている。従来のアモルファスシリコン(Si)を用いたディスプレイパネルと比較して、性能面の向上は確実であるが、IGZO に含まれる酸化亜鉛や酸化ガリウムは酸・アルカリに対して不安定である。さらに、生産工程での加熱/冷却にて酸素の離脱/吸着が容易に起こるために、薄膜トランジスタの特性が容易に変化してしまう。また、亜鉛は汎用性が高く亜鉛鋼板メッキやゴム加硫剤として多量に使われるために、20年以内に資源枯渇が懸念されていることもあり、IGZO 膜の開発が進められていながらも、より安定で亜鉛を含まない酸化物半導体材料が必要である。

## 成果の内容

本研究では、制御が困難で、材料の安定供給が将来的に懸念されるガリウムや亜鉛を使用しない新規酸化物半導体材料として、酸化インジウムに酸化シリコンを少量添加した In-Si-O ターゲットを用い、高性能かつ電氣的・熱的に安定な薄膜トランジスタを作製することに成功した。また、酸化タングステンを添加した In-W-O および酸化チタンを添加した In-Ti-O を用いて薄膜トランジスタを作製し、これら 3 種の添加酸化物( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ )の比較から、少量添加した酸化物材料がトランジスタ素子の動作安定性に密接に関与していることを見出した。

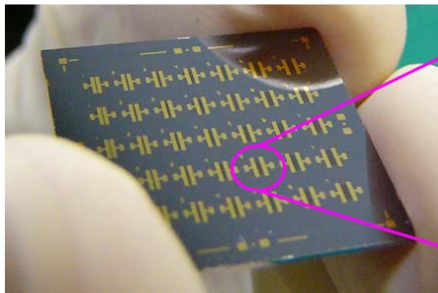
スパッタリングによって室温製膜した薄膜は、極めて平坦かつ均質なアモルファス膜であり、ドーパしたシリコン基板/ $\text{SiO}_2$  絶縁膜上に薄膜を製膜し電極を形成するだけでトランジスタとなる (図 1)。トランジスタの伝達特性 (ソース・ドレイン電極間に電圧を印加して電流を計測し、基板電極をゲート電極としてゲート電圧変化させる測定) は、9 ケタにおよぶ高いスイッチング特性を示し、電界効果移動度も IGZO 膜に匹敵する性能が容易に得られた (図 2)。

さらに図 3 に示すように、成膜時の酸素分圧に対する導電特性の変化を調べたところ、添加元素の違いによって薄膜の伝導の安定性が異なることが分かった。これは酸化物半導体膜中の酸素欠陥と密接に関わる添加物の“酸素との結合解離エネルギー”に大きく依存していることを示している。酸素との結合が強い Si では、膜中への酸素欠陥が容易には出来難くなるため、成膜時の酸素分圧が大きく変化しても導電率が変わりにくく、製膜の際の製造条件が広くなることを見出された。また、極微量な添加量であるにもかかわらず、熱処理に対する伝導特性の変化も抑制できる (安定化) ことがわかった。

金属と酸素との結合解離エネルギーを考えた場合、今回開発された酸化物 (チタン、タングステン、シリコン) の結合解離エネルギーは、Ti-O: 667、W-O: 720、Si-O: 800 kJ/mol であり、IGZO

で用いられているインジウムと酸素 (In-O)、ガリウムと酸素 (Ga-O)、亜鉛と酸素 (Zn-O) の結合解離エネルギー、346、374、250 kJ/mol に比べ大きく、開発された酸化半導体は従来の酸化半導体で使用されていた材料よりも極めて安定性が高いと考えられる。

Si基板上に作製した素子アレイ



素子構造の模式図

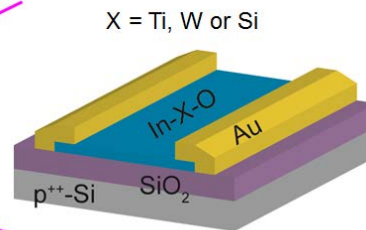


図1. 試作した酸化膜トランジスタの外観写真および素子構造の模式図。

### SiO<sub>2</sub>を添加した酸化インジウム薄膜トランジスタの電流-電圧特性

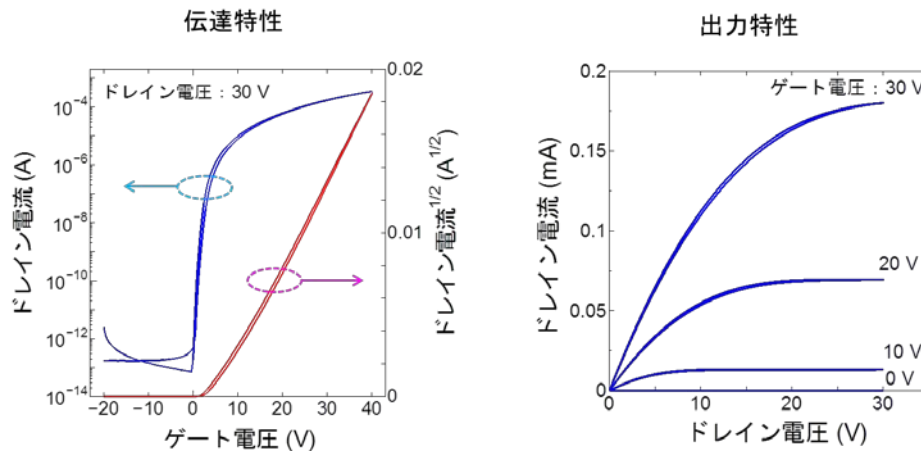


図2. 室温で製膜し、150°Cでアニールすることで得られたSiO<sub>2</sub>を添加した酸化インジウム膜のトランジスタ特性。

### スパッタ時の酸素分圧に対する酸化膜の伝導率変化

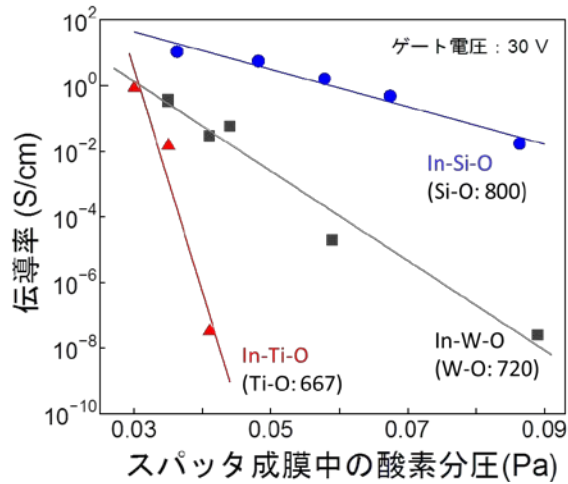


図 3. 酸化膜をスパッタ製膜する際の酸素分圧条件と膜の伝導の相関図。Ti 添加の場合、酸素分圧の変化が伝導度を大きく変えてしまうが、Si 添加の場合は伝導度の変化を小さく抑えられる。この結果として、薄膜に熱を加えても、酸素の離脱や吸収による伝導度の変化が小さい。(図中のカッコ内は添加酸化物其々の結合エネルギー(kJ/mol)を記した)

### 波及効果と今後の展開

今後、添加元素の添加量最適化、熱処理の調整、電極金属の選択、素子構造などの調整をすることで、トランジスタ特性や効率的な製造の向上が期待できる。

#### <用語解説>

##### 1) フラットパネルの画素スイッチ半導体

昨今のフラットパネルディスプレイは、液晶式もしくは有機 EL 式が主流である。画面を構成する画素が縦横に規則正しく配列されており、それぞれの画素を通る光もしくは画素からの発光を、それぞれの画素に配置された薄膜半導体トランジスタで On/Off して文字もしくは画像を表示する。

##### 2) フラットパネルディスプレイ

スマートフォンやテレビのように、ガラス基板上に作られた液晶表示システムが主流となっている。最近では電流を流すと発光する有機 EL も使われるようになってきている。

##### 3) アモルファスシリコントランジスタ、ポリシリコントランジスタ

アモルファストランジスタは大型ガラス上に高スループットで作製できる薄膜トランジスタであり、テレビなどに多く使われている。電界効果移動度は  $0.5\text{cm}^2/\text{Vs}$  程度であり、材料の特性として、移動度を向上させることはできないために、次世代の高精細パネルの駆動するためのフレームスキャン速度に対応できない。

ポリシリコントランジスタは、アモルファスシリコンを製膜後に高温で表面をレーザー照射で多結晶化（ポリシリコン薄膜）させて移動度を向上させた薄膜を用いたトランジスタである。アモルファスシリコンよりも1桁以上大きな電界効果移動度を有するが、製造工程のガラス基板を大型化することが困難であり、スマートフォンやタブレット等の中小型パネルとして使われる。また、ポリシリコントランジスタはアモルファスシリコンよりも製造コストが高くなってしまう。さらに、オフ状態の漏れ電流が甚大であるため、消費電力の根本的な低減には適していない。

#### 4) 電界効果トランジスタ

ソース・ドレイン電極間に繋がれた半導体部分に外部電圧を加えることで、半導体の伝導をオフとオンに切り替えることができる素子。なお、電界効果トランジスタの特性の指標として使われる電界効果移動度は、ゲート電極に電圧を印加してトランジスタの伝導性をスイッチする際に、電流を担う電荷が如何に早く移動するかを示す。素子の材料や構造に大きく依存する。一般的な薄膜アモルファスシリコンの電界効果トランジスタでは $0.5\sim 1$  ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )。

#### 5) 結合解離エネルギー

結合解離エネルギーは、二種類の原子の結合が個々の原子に分解されるとき化学結合の強度として定義される。インジウムと酸素 (In-O)、ガリウムと酸素 (Ga-O)、亜鉛と酸素 (Zn-O) のそれぞれ結合解離エネルギーは、In-O:346、Ga-O:374、Zn-O:250 kJ/mol である。一方、今回使用したチタンと酸素 (Ti-O)、タングステンと酸素 (W-O)、シリコンと酸素 (Si-O) の結合解離エネルギーは、Ti-O: 667、W-O: 720、Si-O: 800 kJ/mol と従来の酸化物半導体に含まれる金属の結合かい離エネルギーより大きいことから、酸素を固定する安定性が高い。

この結合かい離エネルギーから、IGZO 膜の酸素に関する不安定性は構成元素に因る根本的な問題であることを、我々の研究が解明した(本は発表の学理部分)。

#### 6) ディスプレイの電力消費

現在のスマートフォンでは、モバイル機器全体の45%近くの電力がディスプレイで消費されている。ディスプレイが大きなタブレット型では、消費電力が更に大きくなり、全体の70%程度と推定されている。ディスプレイの高精細化に伴って、消費される電力が増大してしまっている。

#### 7) 次世代高精細テレビ

現在開発中の4K2K 高精細テレビでは、高密度の画像情報を高速で切り替えて表示するために、現行テレビよりも高速での画素切り替えが必要となる。このために、画素スイッチングのための薄膜トランジスタの電界効果移動度の向上が必須であり、電界効果移動度 $7\sim 10$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ が必要と見積もられている。この値はアモルファストランジスタでは到達できず、ポリシリコンでは達成できるものの大型画面を効率的に作るができない。このために、大型基板に効率的に作れる高移動度半導体の開発が必要となっている。

この高速薄膜トランジスタの材料候補として、酸化膜トランジスタを挙げることができる。実際に高い電界効果移動度を示すIGZO 薄膜が発見され、一部の製造メーカーによって小型ディスプレ

イの製造が始まっている。しかし、一般に酸化膜半導体はアモルファスシリコントランジスタよりも大きな電界効果移動度を示すものの、大きな面積に均質に製造する方法が十分に確立されていない。これは酸化膜を構成する元素に固有の特性であり、元素構成を結合か、離エネルギーを考慮して設計すれば、移動度が高く大型基板に適応可能な“理想的な薄膜トランジスタ”を実現することが出来るはずである。

#### 8) 特定元素枯渇問題

レアアース/レアメタルとして挙げられる希少金属は、文字通り産出量が微量であったり、産出地域が狭く限定されていたりすることによって、価格変動が国際情勢や投機的な状況によって左右されやすい。さらに、現時点では多量に産出され続けている元素でも、リサイクルが出来ない用途に多量に使われてしまうと枯渇してしまう。その代表例が亜鉛であり、亜鉛メッキ鋼板、ゴム加硫剤、化粧品などの多用途に多量に使われていることから、20年以内に現時点で産出可能とされている原料は枯渇すると試算されている。このような材料は、投機対象となり易く、価格変動が激しくなることから、電子機器の原料としては代換材を見つけ出さなければならない。

#### <本件に関するお問い合わせ先>

##### プレス発表/取材に関する窓口：

独立行政法人物質・材料研究機構

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

##### 研究内容に関すること：

独立行政法人物質・材料研究機構

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点

主任研究者 塚越 一仁 (つかごし かずひと)

TEL：029-860-4894 FAX：029-860-4706

E-Mail：[TSUKAGOSHI.Kazuhito@nims.go.jp](mailto:TSUKAGOSHI.Kazuhito@nims.go.jp)