

Sc系窒化物が拓く 次世代エレクトロニクス： 耐熱性に優れた不揮発性メモリなど への応用展開

上原についてはコチラにも



国立研究開発法人産業技術総合研究所
センシング技術研究部門

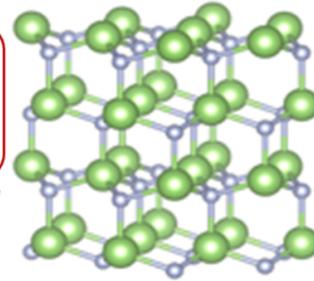
上級主任研究員 上原 雅人

2025年11月18日

本技術の期待される応用展開

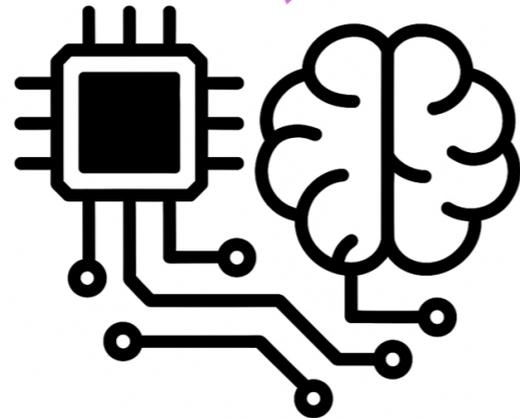
新しい窒化物強誘電体 (これまでになく耐熱強誘電体)

高い残留分極や、
プロセス親和性 (CMOS、BEOL)
を活かした先端チップへの利用



過酷環境IoTエッジデバイス
(センサ、不揮発性メモリ、
ストレージ) としての利用

課題の消費電力について
材料性能に目途



AI用などの先端デバイス

従来 (~300°C) に比べて
窒化物強誘電体の
使用上限温度は~1000°C



原子力 (廃炉作業)
・核融合設備

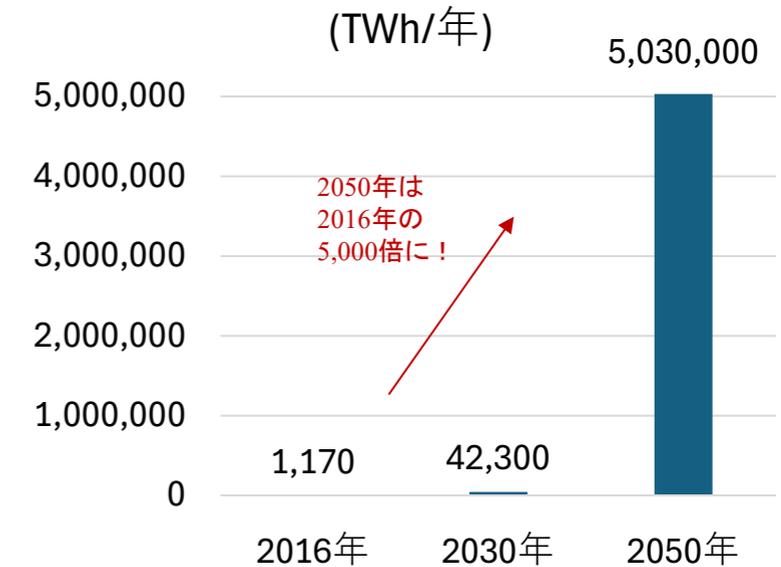
地下資源設備

過酷環境下のシーン

最初に: 不揮発性メモリの重要性

- IoTやAIの普及による情報量やその消費電力の爆発的増大に対応しなければならず、デバイスのテクノロジーの革新が求められています。不揮発性メモリもその一つです。
- 不揮発性メモリは電源オフでもデータを保持できるため、低消費電力化や高速アクセスが可能です。IoT、車載、産業機器など幅広い分野で需要が高まっています。
- 不揮発性メモリ市場は現在の3億ドルから2029年には30億ドルへと10倍に成長すると予測されています（日経エレクトロニクス、2025年4月）。

世界のIT関連消費電力予測



※低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書
JST低炭素社会戦略センター2019年3月に掲載あされている数値をグラフ化

不揮発性メモリに求められる特性

- 電源オフでもデータを保持
- 高速アクセス
- 低消費電力
- 書き換えへの耐性
- 高集積化適性
- 半導体プロセスへの適合性
- 高信頼性・耐熱性
- 環境負荷低減

強誘電体不揮発性メモリの長所

不揮発性メモリにはいくつかの種類がありますが、強誘電体体型は以下のような長所を持っています。

- 電源オフでもデータを保持
- 高速アクセス
- 書き換えへの耐性
- 高集積化適性
- 高信頼性・耐熱性

※強誘電性とは、電圧をかけることで分極方向（結晶の向き）を変えることができる性質のことを言い、情報記憶に利用できる性質です。

従来技術とその問題点①

- 強誘電性型不揮発性メモリの材料として、**チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT)** が用いられています。しかし、鉛含有や微細化の困難さが課題です。
- 最近、**酸化ハフニウム (HfO₂)** 系の開発が進んでいます。微細化が可能ですが、分極が小さく記憶容量や信頼性に課題があります。

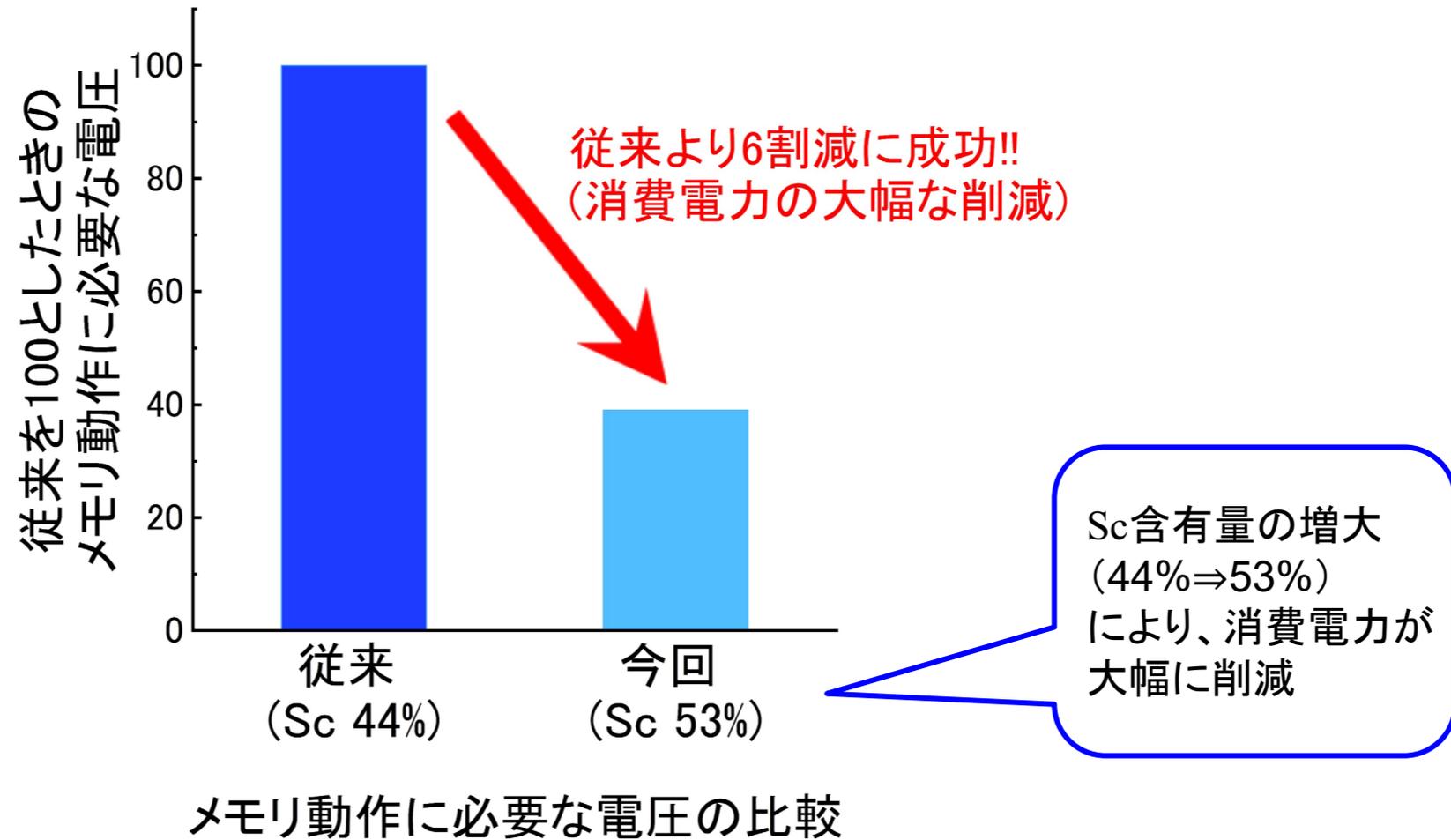
従来技術とその問題点②

- **Sc系窒化物（AlScNやGaScN）** はAlNやGaNにScを固溶することで強誘電性を付与した新材料です。
- 従来の材料に比べて、**多くの情報を蓄える性質（大きな分極）** をもっています。
- **高耐熱性と低温製膜**を両立し、環境負荷の低い材料です。
- しかし、消費電力に問題がありました。

新技術の特徴・従来技術との比較①

- Sc系窒化物（AlScNやGaScN）の課題であった消費電力について、Sc高濃度化により従来^の6割に低減することに成功しました。
- 大きな分極（記憶可能な情報量の多さ）や1000℃の高耐熱性、低環境負荷など、Sc系窒化物はPZTやHfO₂系と比べて魅力的な性質をもっています。

新技術の特徴・従来技術との比較②

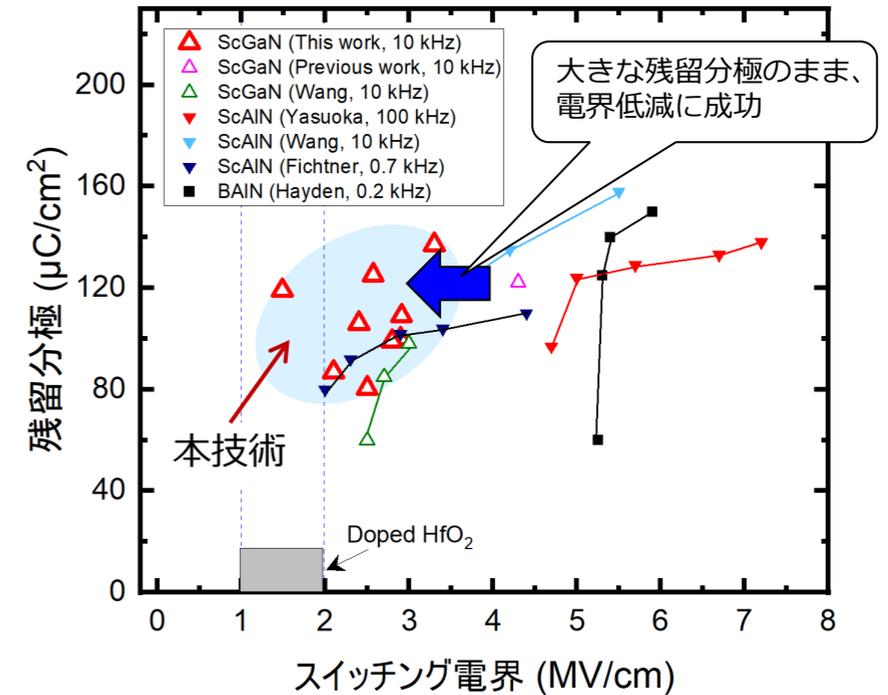


新技術の特徴・従来技術との比較③

	鉛フリー	耐熱性	記憶容量	高密度化・集積化	半導体プロセス適合性	製膜温度
PZT	×	△ (~300°C)	○	×	×	×
HfO ₂ 系	○	△ (~300°C)	△	◎	◎	△
Sc系窒化物	○	◎ (~1000°C)	◎ (HfO ₂ 系の4倍)	◎	◎	◎

Sc系窒化物の魅力

- 大きな残留分極（記憶容量）
- 鉛フリーで環境負荷低減
- 耐熱性（1000°Cでの作動報告有）
- 高集積化（微細化）が可能
- 半導体プロセスとの適合性
- 150°C以下の低温製膜
（スパッタリング法）
- 課題であった消費電力も材料として克服



- ・ 残留分極が大きい（HfO₂系の4倍程度）
ので、大きな記憶容量が期待できる。
- ・ 大きな残留分極のまま、スイッチング電界
（記憶動作に必要な電界）を削減させ、
低消費電力に目途。

Figure is reproduced from Uehara et al., APL Mater., 12 (2024) 12110214),
under the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Sc系窒化物強誘電体の 想定される用途

- 不揮発性メモリやストレージ。特に耐熱性や結晶の安定性から、車載用や過酷環境用デバイス。データセンターなども。
- 圧電性能を利用した周波数フィルタやセンサ。
- 強誘電性（電圧による結晶の向きを反転）を利用した光スイッチングデバイスなど。

補足資料: 米国における高温・過酷環境向けメモリ技術の動向 (主要企業と資金投入状況)

企業名	資金額 (百万USD)	用途
Cerfe Labs	1.8	500°C動作・戦略システム向けNVM※1
Western Digital	35	宇宙・戦略兵器向けRad-Hard NVM※2
SkyWater Technology	99	Department of Defense (米国国防総省) 向け90nm Rad-Hardメモリ
BAE Systems	12	衛星搭載RAD750プロセッサ
Honeywell	15	放射線耐性センサ・制御系
Microchip Technology	10	航空・防衛向けRad-Hardメモリ
SunRise Memory	8	極限環境向け3D FeRAM

※1: NVM (Non-Volatile Memory、不揮発性メモリ)、※2: Rad-Hard (Radiation-Hardened、放射線に対して丈夫な)

<https://www.sbir.gov/portfolio/1703963>

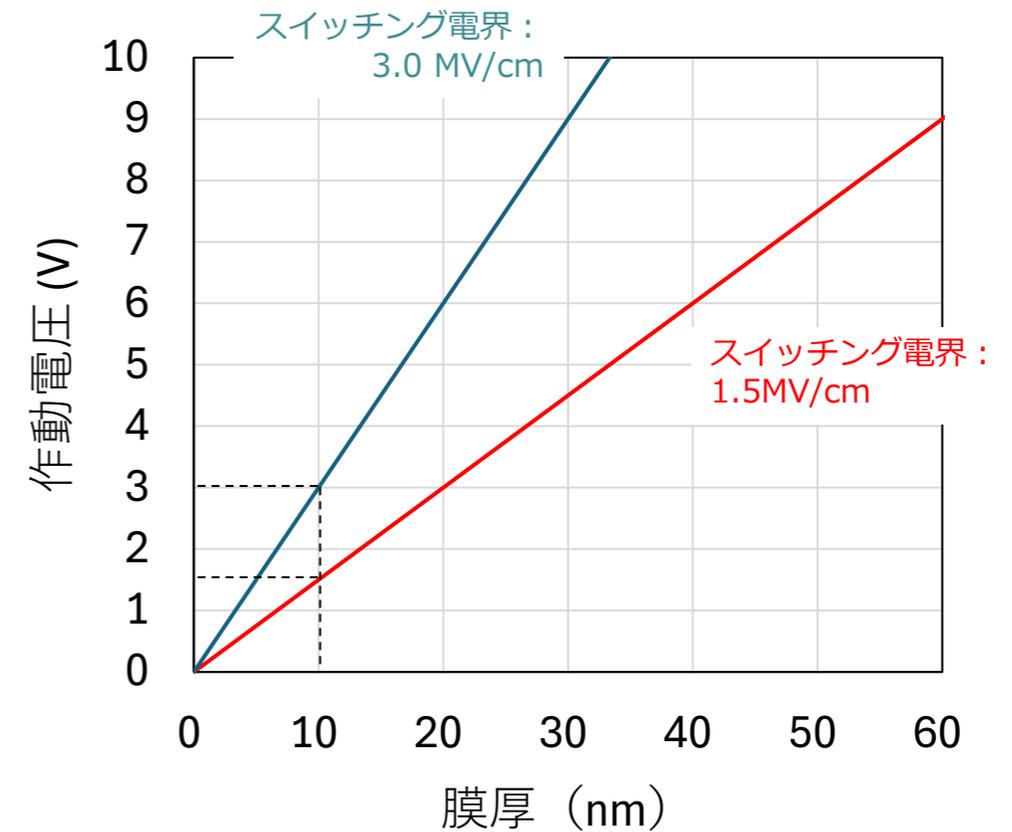
https://www.defensemirror.com/news/35388/Western_Digital_to_Develop_Radiation_Hardened_Memory_for_the_Pentagon

<https://www.skywatertechnology.com/u-s-department-of-defense-awards-skywater-up-to-99m-in-additional-funding-to-advance-rad-hard-technology-to-productization-and-qualification/>

<https://www.darpa.mil/research/programs/optimum-processing-technology-inside-memory-arrays>

実用化に向けた課題

- 材料としての基本性能を高めることに成功しましたが、デバイス化や量産化には課題があります。
- デバイスの消費電力（作動電圧）を下げるために、膜厚を薄くする必要があります。
 - スイッチング電界3M V/cm: 膜厚10nmならば、作動電圧は3V
 - スイッチング電界1.5 MV/cm: 膜厚10nmならば、作動電圧は1.5V
- 薄くても書き換え疲労耐性（ 10^{12} 回以上）が必要です。
- ※複合窒化物であるScGaNのスputタリング法での極薄膜成膜技術の開発に取り組んでいます。
- 最適なデバイス構造の開発
- 大面積化など量産化技術の開発



社会実装への道筋

時期	取り組む課題	社会実装へ取り組み
基礎研究	<ul style="list-style-type: none"> ・ GaScN強誘電体のスパッタリング法による製膜に成功 	
現在	<ul style="list-style-type: none"> ・ スイッチング電界を6割低減に成功 材料として低消費電力化に目途 	JST A-step ステージIに採択
1.5年後	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電極層や極薄膜技術など、デバイス化技術を開発 ・ デバイス作動電圧を3V 以下に 	メモリなどデバイスの試作開始
3年後	<ul style="list-style-type: none"> ・ デバイス作動電圧を1.5 V以下に (製膜技術の開発による結晶性向上および極薄化の確立) ・ デバイスの主要特性の評価 (耐久性、書き込み速度) 	企業へのサンプル提供や連携開始
5年後	<ul style="list-style-type: none"> ・ 企業による量産化技術の開発 	量産化に向けた企業連携の開始
8年後	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実用化 	

企業への期待

- 用途開拓に向けた技術的フィードバック
- 試作・評価環境の提供
- 共同研究・事業化への参画
- 知財・標準化活動への協力

企業への貢献、PRポイント

- 我々の開発したSc系窒化物強誘電体は「鉛フリー・高耐熱・低温製膜」が可能のため、車載や産業用途、過酷環境下での高信頼性メモリやストレージ、センサ開発に貢献できると考えています。
- 本技術の導入にあたり科学的な裏付けを行います。
- 本格導入にあたっての材料開発や製造方法開発、デバイス評価について技術的サポートを行います。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 強誘電性薄膜、それを用いた電子素子および強誘電性薄膜の製造方法
- 特許番号 : 7 2 6 0 8 6 3
- 出願人 : 産業技術総合研究所
- 東京科学大
- 発明者 : 上原雅人 他
- ※米国、中国、韓国、台湾でも登録済み
- ※この他にも関連特許あり

産学連携の経歴

- 2024年～現在 JST A-step事業を実施
 - ※その他、企業との共同研究を多数実施

お問い合わせ先

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
エレクトロニクス・製造領域 連携推進室
e-mail rpd-eleman-ml@aist.go.jp