

2020年度 新産業創出研究会「研究成果報告書」

「単分子誘電体を組み込んだ超高密度分子メモリの精密特性評価」

[広島大学・教授] [西原 禎文]

1. はじめに

ビッグデータ活用やIoT産業の活性化が進む中、それらを支える大容量・高密度ストレージに対する需要は日々高まっている。一方で不揮発性メモリ(HDD やフラッシュメモリなど電源を切っても情報を保持し続けるメモリデバイスの総称)の記録密度は、熱揺らぎによる情報記録消失の問題から(超常誘電・超常磁性問題)、既に頭打ちの状況にあり、解決の糸口さえ掴めない難題として立ちはだかっている【図1】。記録密度に限界値が存在する理由として、不揮発性メモリに不可欠な強磁性質(強誘電性や強磁性)が原子や分子の集合体でしか発現しないことが挙げられる(不揮発性メモリの記録密度限界は、材料の微細化限界に依存しており、1 Tbit(テラビット)/inch²とされている)。この問題を解決するため、多層化や熱アシスト技術などの工夫が成されているが、根本的な解決には至っていない。

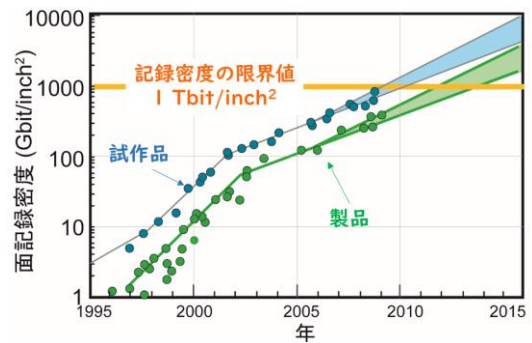


図1. 近年の記録密度の推移と、示唆されている物理的な記録密度の限界値。

このような背景の中、我々は単一分子で強誘電的な振舞いを示す「単分子誘電体」の開発に、世界で初めて成功した。この分子は、従来の材料とは全く異なる発現機構により特性を発現するため、既存の微細化限界に捉われず、単分子まで微細化しても特性を維持し続ける。従って、「単分子誘電体」をメモリ素子として実用化できれば、分子一つ一つに情報を格納することができ、既存の記録密度限界を 1000 倍上回る超高密度ストレージの開発が期待される。本研究では、単分子誘電体を実装したメモリデバイスの実用化を目指し、その初動研究に着手した。

以下には、本研究の根幹となる「単分子誘電体」の発現機構について記載した。

「単分子誘電体」はかご状の無機分子、Preyssler 型ポリオキソメタレート【図2a】で観測される。この分子は内部に筒状の空洞を有し、そこに1つのテルビウムイオン(Tb³⁺)が格納されている。Tb³⁺は空洞の中心からずれた位置に2か所の安定なイオンサイトをもち、どちらか一方に存在している【図2b】。このとき分子は、Tb³⁺イオンの存在位置に応じた分子分極を有しており、Tb³⁺イオンが安定サイト間をイオン移動することによって分子分極の反転が起こる。このイオン移動にエネルギー障壁が存在するとき、障壁よりも十分低い温度域ではイオン移動が抑制され、分子分極が凍結する【図2c】。この温度域で、外部電場を印

加すると、イオン移動を強制的に誘起することが可能となる。実際、この材料は強誘電秩序を示さないにもかかわらず【図2d】、室温以上で強誘電体に特徴的な分極ヒステリシス(メモリ効果)【図2e】や自発分極【図2f】を示す。さらに、この分子を高分子内に分散させ、分子間相互作用を断ち切った状態であっても同様の性質を有する「単分子誘電体」であることを明らかにした。

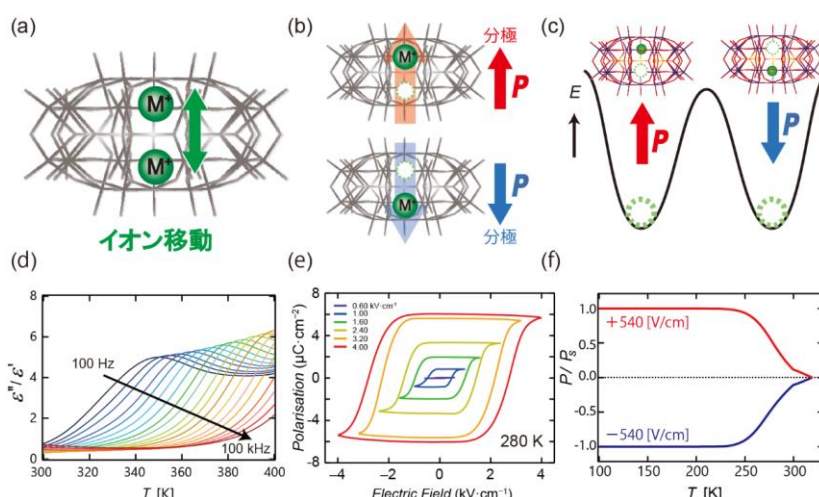


図2. (a)「単分子誘電体」の分子構造。分子内部には2箇所の等価な M^+ イオン安定サイトが存在し、そこに1つの金属イオン (M^+) が格納されている。(b) M^+ イオンの停止サイトによって、分極が反転する様子。(c) 2つのサイト間にはエネルギー障壁が存在し、分極二極小ポテンシャル構造を形成している様子。(d) M^+ として Tb^{3+} を用いた $K_{12}[Tb^{3+}P_5W_{30}O_{110}]$ の誘電損失の温度依存性。(e) $K_{12}[Tb^{3+}P_5W_{30}O_{110}]$ の分極-電場曲線。室温で分極ヒステリシスが観測された。(f) 電界ポーリング処理後の $K_{12}[Tb^{3+}P_5W_{30}O_{110}]$ が示した自発分極測定結果。

2.概要

本研究では、単一分子で強誘電体のような振る舞いを示す「単分子誘電体」を実装した不揮発性メモリの実用化を目指す。これまでに、10 nm の「単分子誘電体」薄膜を実装した電界効果トランジスタ(FET)型デバイスプロトタイプを作製したところ、ゲート電圧の掃引に対してドレイン電流の履歴現象(メモリウィンドウ)が確認され、室温でメモリとして駆動することを明らかにしている。

「単分子誘電体性」は分子内のイオン移動によって分極反転が起こることで発現する。このイオン移動は分子内で一方向にのみ起こる為、単分子誘電体薄膜の分子配向によってデバイス特性にばらつきが生じる。言い換えると、配向性の高い単分子誘電体薄膜を実装することで、高性能分子メモリの実現に繋がる。そこで、本研究では、配向性の高い単分子誘電体薄膜の成膜条件精査を担う。

3.研究成果および今後の課題

Preyssler 型ポリオキソメタレートは、30個のタングステン、110個の酸素、5個のリン原子から成るアニオン性の金属酸化物であり、材料内には電荷中和に用いられるカウンターカチオンが含まれる。様々なカウンターカチオンとの塩を作製し薄膜の配向性について評価したところ、カウンターカチオンにテトラブチル

アンモニウムを用いた場合、分子配向性の高い薄膜を得ることに成功した。今後は、同薄膜を用いたデバイス作製および特性評価を行い、「単分子誘電体」を実装したデバイスの実用化を目指す。

4. おわりに

本研究を通して、将来的な実用化の上で問題となる課題の達成に向けた技術的指針を得ることに成功した。また、研究会の定例会議などを通して、研究の方向性をブラッシュアップすることにも叶い、特許出願や他助成金の獲得など、効果的な成果を得た。引き続き研究を遂行し、将来的には「単分子誘電体」によるメモリデバイスを実用化することで、新産業創出に貢献することを目指す。

5. 本研究の今後の計画

今後は、デバイス作製および特性評価を中心に実施し、「単分子誘電体」を実装したメモリデバイスの実用化に向けた研究を引き続き進める。また、得られた成果は、論文や特許などとして報告していく。

6. その他

(1) 出願特許(タイトル・出願番号・発明者・特許権者など)

“単分子誘電体膜および単分子誘電体膜の製造方法”，特許出願 2020-128339，西原禎文・藤林将

(2) 投稿論文(タイトル・学会名等)

“Welcome to single-molecule electret device”, S. Nishihara, Nat. Nanotechnol., 15, (2020) 966-967.



競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。

<https://jka-cycle.jp>