

RRAMの原理はどこまで理解できたのか？



井上 公

産業技術総合研究所

RRAM (または ReRAM) というのは 15 年ほど前に発明されたメモリ素子のことだ。「絶縁体を金属電極で挟んだだけ」のコンデンサとそっくりな構造である。トランジスタの「ゲート」に相当する 3 端子目が必要ないので、原理的には最も微細化可能なメモリ素子ということになる。語頭の R は電気抵抗 (resistance)。2 端子間の抵抗が低いときが「1」、高いときが「0」に相当する。この「1」と「0」、つまりオン状態とオフ状態は電圧をゼロにしても保たれる。つまり不揮発メモリである。これに対して DRAM や SRAM といった現代の計算機に必須の高速メモリは、電圧をゼロにすると情報が失われる揮発メモリだ。SRAM と DRAM を不揮発メモリの RRAM で置き換えれば、オンオフを切り替える瞬間にしか電力を使わない「ノーマリーオフ」の、劇的に省エネルギーなコンピュータが誕生する。実際に RRAM が高速動作を示すという研究報告も増えており期待が高まっている。

なぜ抵抗値が不揮発に変化するのか？なぜ 2 端子で動作するのか？ 様々な興味深い原理が提唱されたが、現在では「金属電極と絶縁体との界面での電気化学反応、価数の変化、構造相転移といった現象」がメモリ動作の起源であると考えられている。しかしそのような界面現象の再現性を電子デバイスとして実用化できるほどに高めるとするのは容易なことではなく、現象への理解が深まるにつれて実用化を疑問視する声が聞こえてくる時期もあった。

ところがこの数年で状況は一変する。高速無線技術や膨大なデータを共有できるクラウド技術が急激に発展し、モバイル機器

どころかウェアラブル機器までが次々と登場した。機械や装置どうしがインターネットで繋がり情報伝達する「モノのインターネット (IoT)」の時代の到来である。IoT の鍵を握るのは「微細化に有利で、省電力で、かつ高速に読み書きできる」メモリ。まさに RRAM にほかならない。IoT 関連の市場規模は 2020 年には 9 兆ドルになるという予想さえあり、第 4 次産業革命だとも言われている。ニッチだとかスキマだとか思われていた市場が巨大な市場に変貌してきたのだ。特に体内に埋め込むウェアラブル機器は RRAM の独壇場になるかもしれない。現在の半導体メモリには医療機器の殺菌処理に必要なガンマ線に対する耐性がないからだ。昨年あたりからは RRAM が搭載されたモバイル機器が市販されるようにまでなってきた。

したがって、RRAM の原理がどこまで理解されたのかをこの機会に知っておくのは悪くない。ただし RRAM と呼ばれる素子には非常に多くの種類があるので、まずそこを整理する必要がある。研究の性質上、「メモリ特性が良いか悪いか」の視点で議論されることがこれまでは多かったが、これだと物理の研究者には敷居が高いようだ。そこで本稿では「RRAM の電流-電圧特性曲線の分類」に的を絞って、メカニズムの理解に繋がる実験結果のみを整理する。物理研究者にとっての研究の入り口になることが目的である。物理の研究者でなくとも、他のレビューとは違う視点からの整理に接することで、斬新なアイデアの誕生に繋がるかもしれない。RRAM 研究の新展開がここから始まることを期待したい。

—Keywords—

DRAM :
Dynamic Random Access Memory の略。トランジスタ 1 個とコンデンサ 1 個からなる半導体メモリ。コンデンサに電荷が蓄積されている (“1”) が蓄積されていない (“0”) かでメモリ動作する。電源の供給を断つと情報が失われる揮発性メモリである。電源が供給されている間も、コンデンサの自然放電で情報が消失するのを防ぐために毎秒数十回程度、情報のリフレッシュを行う必要がある (ゆえに「動的」RAM と呼ばれる) ので、消費電力が大きい。1 ビットあたりの素子が 2 つですむので低コストである。

SRAM :
Static Random Access Memory の略。フリップ・フロップ回路の性質を用いた半導体メモリ。電源の供給を断つと情報が失われる揮発性メモリである。フリップ・フロップ回路はコンデンサを使わないのでリフレッシュを行う必要がない (ゆえに「静的」RAM と呼ばれる)。消費電力が小さく、高速動作できるが、回路が複雑 (トランジスタ 4~6 個) なので 1 ビットあたりのコストが大きい。

ニッチ・スキマ :
世に良く知られている事象の「隙間」にあって盲点となっている部分。