ナノエレクトロニクス

シリコンテクノロジーの向こうにあるもの

「フラッシュメモリを磁気ハードディスクの代わりに搭載したノート型のパソコンが販売される」というニュースが、2006年春に相次いでプレスリリースされました。サーバー用超大容量情報記録媒体としての磁気ハードディクスの用途が無くなることは今のところ考えられませんが、少なくとも、パソコンにおける「情報処理は半導体素子」「情報記録は磁気デバイス」という役割分担は、シリコンテクノロジーの進展によって過去のものとなりつつあります。それ以外にも、携帯電話やデジタルカメラにおける記録媒体など、私たちの身の回りのありとあらゆるところにフラッシュメモリが見られるようになりました。

ご存知のように、大容量かつ安いビットコスト、そして最近では高速化をも視野に入れたこのメモリは、ナノメートルサイズでその構造を制御するシリコンテクノロジーの最先端技術によって開発されてきたものであり、その意味では、何をいまさら「ナノエレクトロニクス？」とも言えます。

一方、いくらシリコンテクノロジーが超極微細化技術によってその性能を向上させたとしても、いつかは必ず限界が来ます。前述のフラッシュメモリに関しては、このまま微細化が進んだ場合2010年頃に不可避的な動作限界を迎えることが指摘されるようになりました。

産総研では、そのときになって慌てることのないように、いまからシリコンテクノロジーの更に向こうにあるナノエレクトロニクスに関する研究開発を進めています。それを大雑把に分類してしまえば、「シリコン素子を超える特性を示すもの」「シリコン素子とは動作原理が異なるもの」の研究開発です。前者の代表例としては、熱伝導率が高くパワーを必要とする用途における性能がシリコンを凌駕する炭化シリコンやダイヤモンド半導体の材料と素子の開発が挙げられますが、ここでは後者に的を絞ってその典型例を紹介します（前者については本誌10～11ページに紹介されています）。

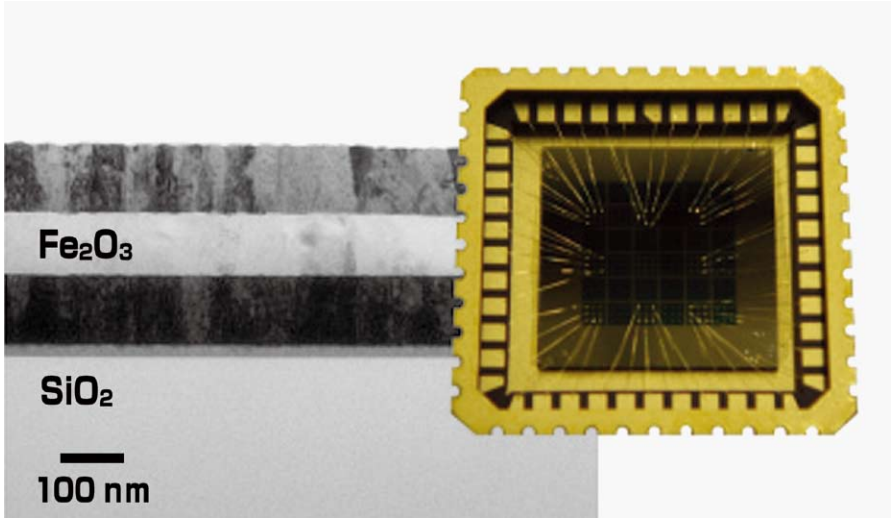

図1　酸化鉄からなる抵抗変化メモリ構造の断面透過型電子顕微鏡イメージ（左）と、そのプロトタイプメモリ素子（右）

機能性酸化物を用いたナノエレクトロニクス

シリコンテクノロジーが大きな成功を収めた一つの理由は、酸化シリコン（SiO_2）という絶縁特性が高い酸化物を原子レベルで平坦に形成する技術が開発できたからということができます。しかし、ナノメートルも1桁の領域となれば、この優れた絶縁体をもってしても、電子の漏れを食い止められなくなってしまいます。高い誘電率を持つ新しい酸化物を用いたゲート絶縁膜の研究が盛んに行われているのはそのような理由からです。

一方、酸化物には、例えば電界を印加することによって、電気伝導度を大きく変えるようなものもあります。産総研ナノテクノロジー研究部門では、強相関電子技術研究センターなどと共同で、このような機能性酸化物の特性評価からメモリ応用を目指した研究を行っています。

図1は、皆さんの足元にある砂鉄とほぼ同様な組成を持つ鉄酸化物を用いて、抵抗変化メモリ動作の実証を行った素子の写真です。電力を供給しなくてもデータを記録し続ける不揮発性メモリの次世代候補として研究開発が進められているものの中で、このような抵抗変化メモリは、特に、シリコンテクノロジーとの相性の良さと信号変化の大きさなどの観点から非常に有望であると考えられています。

さて、シリコンテクノロジーが成功を収めたもう一つの大きな理由は、極微細加工技術、特に様々なエッチング技術の開発ができたことにあります。

例えば、SiO_2に対してSiのみを選択的に削る（これをエッチングといいます）ということも、適当な反応性ガスを用いた気相エッチングによって実現されます。次節では、このエッチングプロセスの開発について紹介します。

ナノスピンエレクトロニクス

既存のエレクトロニクスでは電子の流れやその量を制御することによって素子が動作しますが、電子の持つもう1つの自由度であるスピン自由度を用いて新しい原理に基づくデバイスを開発しようという研究がはじまっています。スピンは、電子の自転運動にたとえられることがありますが、その右回りと左回りをスピン上向きと下向きのように定義します。身近なイメージとしては、永久磁石があります。大雑把な言い方をしてしまえば、スピンがどちらか一方に揃うと磁化が発生し、その磁化が不揮発であったり、スピンの反転が超高速であったりする特性を用いて新しい素子を作ることができます。

すでに私たちの身の回りの素子に使われているスピンエレクトロニクス素子の代表例にはハードディスクのデータ読み取りヘッドがあり、また近い未来には、強磁性金属と絶縁体の積層膜からなる磁気ランダムアクセスメモリも実用化されるでしょう。では、それらの実用化のために、シリコンテクノロジーを成功に導いたような極微細加工プロセスの開発は行われているのでしょうか？

答えは、否です。プロセス開発は、ノウハウの塊であると同時に、学術的に扱われてこなかったという経緯から、系統立てた研究開発手法が存在しません。

図2　Ti（チタン）をマスクとして、NiFe（パーマロイ）を反応性イオンエッチングによって加工した構造の断面走査型電子顕微鏡イメージ（黒破線は、各材料の境界を示すために書き加えたもの）

産総研ナノテクノロジー研究部門では、きたるべきスピンエレクトロニクス素子の極微細化に備えて、反応性イオンエッチング・プロセスの開発を行っています。また、計算機シミュレーションを援用し、その研究開発を速やかに進めるための手法開発も行っています。

図2は、NiFeと呼ばれる強磁性体合金を、メタン系ガスを主成分とした混合ガスのプラズマを用いてエッチングした構造の断面を走査型電子顕微鏡で観察したものです。Tiメタルマスクとの選択比をほぼ無限大にまで高めることができました。今後、強磁性体金属の極微細加工技術として活用されることが期待されています。

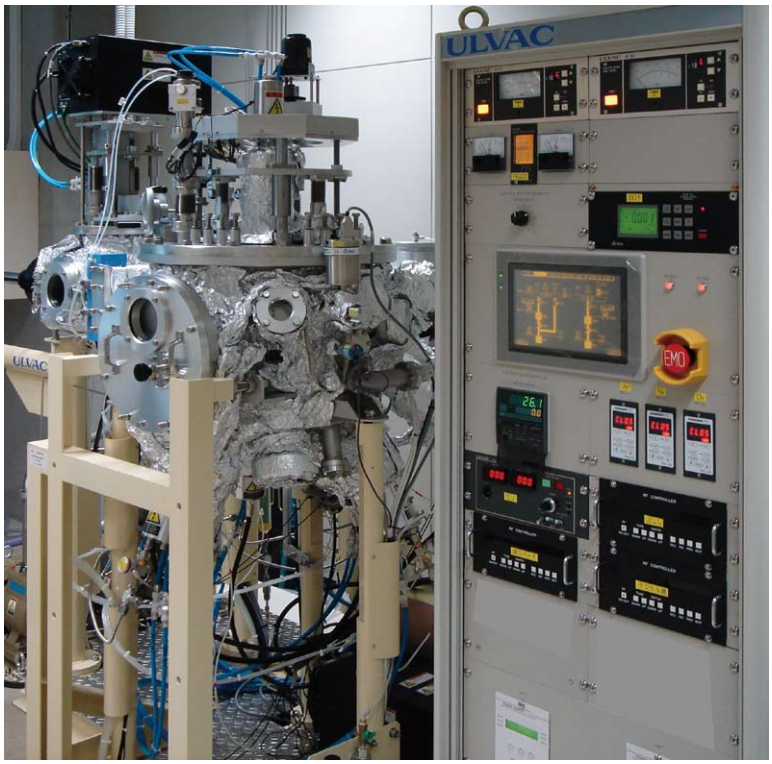

写真　遷移金属酸化物薄膜を成膜するためのラジカル酸化源を備えた真空蒸着装置（遷移金属酸化物では酸化状態に依存してその機能が大きく変わり、成膜ノウハウを確立することはメモリ開発上必須である）

ナノテクノロジー研究部門
秋永 広幸