

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)
大阪科学・大学記者クラブ(資料配布)



従来より 10 倍以上も超高密度のデジタル情報を炭素分子の薄膜へ 書き込み/書き換え/読み出しできる新方法を開発 —究極のナノテクノロジーから生まれた次世代情報素子の基幹技術—

平成22年3月4日

独立行政法人 物質・材料研究機構

国立大学法人大阪大学大学院工学研究科

概要

独立行政法人 物質・材料研究機構 [NIMS] (理事長:潮田資勝) 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 [MANA] (拠点長:青野正和)の中山知信グループリーダーと中谷真人 NIMS 研究員、大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻の桑原裕司教授らのグループは、近年注目されている炭素原子からなるフラーレンと呼ばれる分子の一つである C_{60} 分子の間の化学結合を分子スケールの局所において機能性分子間の化学反応を単分子スケールの精度で自在に制御する方法を発見し、それを基に、記録媒体へ不揮発のデジタル情報を超高密度に蓄積する新技術の開発に成功した。本研究成果は、今後、大容量で小型な次世代ストレージ素子¹⁾を実現するための基幹技術へ発展する可能性を秘めている。

本研究グループは、新しい原理で駆動するエレクトロニクスの構築を目指して、 C_{60} 分子間へ化学結合を形成した状態(結合状態)と結合を解消した状態(非結合状態)を自在に制御する方法を開発してきた。今回、フラーレン C_{60} 分子²⁾の超薄膜を記録媒体として利用し、現在実用化されている高密度情報蓄積技術に比べ約 1,000 倍、基礎研究レベルの技術と比較しても従来の 10 倍以上の超高密度デジタル情報を蓄積する方法を開発した。通常、 C_{60} 分子は分子間力で凝集し固体結晶を構成しているが、高温・高圧条件下や電子線などの照射によって分子間に化学結合が形成されることが知られていた。このたびの情報蓄積法の開発は、分子薄膜中の意図した C_{60} 分子の結合/非結合状態を室温制御する新しい方法の発見と、その現象の機構を詳細に解明する基礎研究に基づいて行われた。

記録媒体である C_{60} 超薄膜へ先鋭化させた金属針を接近させ、金属針直下の C_{60} 分子へ化学反応を誘起する研究を系統的に行ったところ、 C_{60} 分子の結合状態と非結合状態を意図的に選択する方法を見出した。結合状態(“1”)と非結合状態(“0”)からデジタル情報を構成し、情報蓄積を行ったところ、既存のストレージ素子の約 1,000 倍の面密度でデジタル情報を記録、消去、再記録することに成功した。この蓄積情報は、室温下で良好な不揮発性を示す。さらに、“1”および“0”状態を簡便に読み出す方法を考案し、その実証にも成功した。研究グループは結合する C_{60} 分子の数の制御によって、“2”, “1”, “0”の多値記録にも成功した。

本研究成果の詳細は学術雑誌 Advanced Materials(出版社:WILEY-VCH)へオンライン掲載されており(DOI: 10.1002/adma.200902960)、現在印刷中である。また、今回発表された、記録媒体とそれを用いた情報蓄積方法は国際特許出願済(PCT/JP2008/054917)である。

研究の背景

大容量情報の蓄積は高度情報化社会を支える基盤技術の一つであり、それを担うストレージ素子の持続的な高性能化が求められている。ストレージ素子の性能は、記録媒体への情報蓄積密度と密接に関連する。即ち、蓄積密度の向上によって、素子の小型化、大容量化などが推し進められてきた。最も普及しているストレージ素子であるハードディスクドライブでは、約 300 ギガビット毎平方インチの蓄積密度を実現している。そして、さらに高性能な次世代素子へ向けて、現在、テラビット毎平方インチ(テラビット = 1000 ギガビット)以上の“超高密度”情報を安定に蓄積するための技術開発が非常に活発化している。

このような背景のもと、本研究グループでは、媒体材料としてフラーレン C_{60} 分子を用い、個々の C_{60} 分子をビットセル³⁾として情報蓄積する方法の研究を進めてきた。 C_{60} の興味深い特徴として、分子間に化学結合を形成すると、全く異なる機能・性質を発現する点が挙げられる。上記のストレージ素子を含め、エレクトロニクスへの駆動には、構成材料の物理・化学的性質の変化に基礎をおくものが多いため、 C_{60} 分子間の結合／非結合状態を自在に制御する方法論は、エレクトロニクスの新しい駆動原理として利用価値が極めて高い。しかしながら、 C_{60} に分子間結合を形成するための従来の方法では、紫外・可視光照射や高温高压印加などが必要であり、また、分子間結合を効率的に解消するためには、100~200 °C での加熱処理が必要とされてきた。このため、 C_{60} 分子の結合／非結合状態をナノスケールで制御することは困難であり、それを利用したエレクトロニクスも実現へ至らなかった。

本研究成果では、意図した C_{60} の分子間結合の形成とその解消を“室温”において“単分子スケールの精度”で制御する新しい方法論を発見し、それを応用することで、不揮発のデジタル情報を超高密度に蓄積する方法を開発した。

研究成果の内容

記録媒体として、導電性の基板材料(シリコンあるいはグラファイトを利用)上へ 3 分子層の厚さをもつ C_{60} 超薄膜を真空蒸着法によって形成した。そこへ、先鋭化された金属針を距離 1 ナノメートル未満まで接近させ、その状態で基板側へ電圧を印加することで、金属針直下の C_{60} 分子へ化学結合の形成と解消を誘起した(図 1)。金属針の位置調整には走査トンネル顕微鏡⁴⁾の制御システムを利用した。この方法で C_{60} 分子間へ化学結合を誘起すると、超薄膜の表面へ幾何学的な窪みが形成される(図 1 右側)。この性質を利用して、結合状態[窪みが有る(“1”)]と非結合状態[窪みが無い(“0”)]からデジタル情報を構成した(図 1 および図 2)。

本研究成果の鍵となるのは、 C_{60} 分子の結合／非結合状態の制御であり、これは基板へ印加する電圧の極性(正 or 負)を切り替えることで、室温下において簡便に実行できる。即ち、負および正の電圧を印加することで、それぞれ結合状態と非結合状態を意図的にかつ可逆的に実現できる。この制御機構に関する基礎科学的な研究を行った結果、金属針下の強電界による分子の負および正イオン化が分子間結合の形成と解消をそれぞれ促進することを明らかにした。

以上の制御方法を利用して、デジタル情報を 190 テラビット毎平方インチの超高密度で記録、消去、そして再記録することに成功した(図 3)。この記録密度は現行素子のものに比べ約 1000 倍の値に相当する。また、蓄積情報は、室温下で良好な不揮発性を示すことを確認した。さらに、金属針と C_{60} 薄膜間の電気抵抗から“1”および“0”状態を簡便に識別する方法を考案し、これを利用して蓄積情報を効率的に読み出せることを実証した(図 4)。現在は、情報蓄積動作の高速化に関する研究を進めているところであり、これまでに、超高密度情報を約 1 キロビット毎秒の速度で記録することに成功している。

波及効果と今後の展開

以上のように、今回、デジタル情報を従来に比べ遥かに高密度に蓄積する新しい方法を提案し、その基本動作を実証した。これは、大容量で小型な次世代ストレージ素子の基幹技術となり得る可能性を秘めている。また、機能性分子材料への情報蓄積法を開拓したことにより、よりフレキシブルで携帯性の高い記録媒体の実現へもつながると期待される。一方で、より実用的な研究開発を展開するためには、情報蓄積動作のさらなる高速化(ギガビット毎秒以上)が必須である。この要求を満たすためには、多数の金属針を独立に駆動させ並列に情報蓄積するために、大規模並列プローブ法⁵⁾等を取り入れたシステム設計・開発が必要である。

また、今回示したC₆₀分子の結合/非結合状態を室温制御する方法論には、データストレージ素子以外にも、多くの応用分野が開けている。分子間結合の制御ファクターは分子の静電的イオン化であり、これは図1の装置構成に限定されるものではない。例えば、電界効果トランジスタ⁶⁾の素子構成とそのゲート制御法を利用することで、C₆₀分子の結合/非結合状態を固体素子中で制御することも期待できる。これは、分子スケールで高集積化された不揮発性メモリ素子、スイッチング素子、センサー素子の開発へ道を拓くであろう。

問い合わせ先:

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

独立行政法人 物質・材料研究機構

広報室 TEL:029-859-2026

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ニクス研究拠点

ナノ機能集積グループ グループリーダー

中山 知信(なかやま ともなぶ)

TEL: 029-860-4129

FAX: 029-860-4886

E-mail: NAKAYAMA.Tomonobu@nims.go.jp

【用語解説】

1) ストレージ素子

デジタル情報やプログラムを記録する装置。ハードディスクドライブ (HDD) やデジタルバーサタイルディスク(DVD)がこれに相当する。記憶容量が大きく、電源を供給しなくても記録情報が消えないという特徴があり、主に情報を保持する記録媒体と、情報の記録、消去、読み出しを行う駆動装置から構成される。

2) フラーレン C_{60}

フルーレン類は炭素原子 (C) のみで構成されるかご型分子の一群。 C_{60} はフルーレン類中で最も代表的な分子であり、H. W. Kroto、R. E. Smalley、R. F. Curl によって 1985 年に発見された。 C_{60} は C 原子を直径 0.71 ナノメートルのサッカーボール形状に配置した分子構造をもつことで良く知られている。

3) ビットセル

情報記憶装置内において、デジタル情報の基本単位を記憶するための領域あるいは構造体。

4) 走査トンネル顕微鏡

1982 年に G. Binnig と H. Rohrer によって発明された表面観察装置。非常に鋭く尖った金属探針を導電性試料へ極めて精密に接近させ、試料と金属探針間に電圧を印加したときに流れるトンネル電流を利用して試料表面の電子状態、幾何学構造を原子レベルで観察する。

5) 大規模並列プローブ法

IBM Zurich 研究所の P. Vettiger らが 2002 年に発表した millipede (ムカデの意) に代表される多数のプローブを並列あるいは独立制御する手法。ナノスケールの鋭い先端を持つプローブを多数配置した構造は半導体加工技術を駆使して作製され、プローブを用いたナノ加工やナノ計測は、一般的には処理速度が遅いとされるが、多数のプローブを同時に操ることによってその速度を飛躍的に高める手法として研究が進められている。

6) 電界効果トランジスタ

トランジスタの一種でスイッチング素子や増幅素子として利用される。半導体の結晶、薄膜、細線、クラスタなどからなる機能部位へソース、ゲート、ドレインの 3 つの電極を接続した素子構造を持つ。ゲート電極へ電圧をかけ機能部位へ電界を発生させることでソース-ドレイン電極間を流れる電流を制御する。電界効果トランジスタは小型化や集積化に優れているので、集積回路を構成する主要な素子として極めて多用されている。

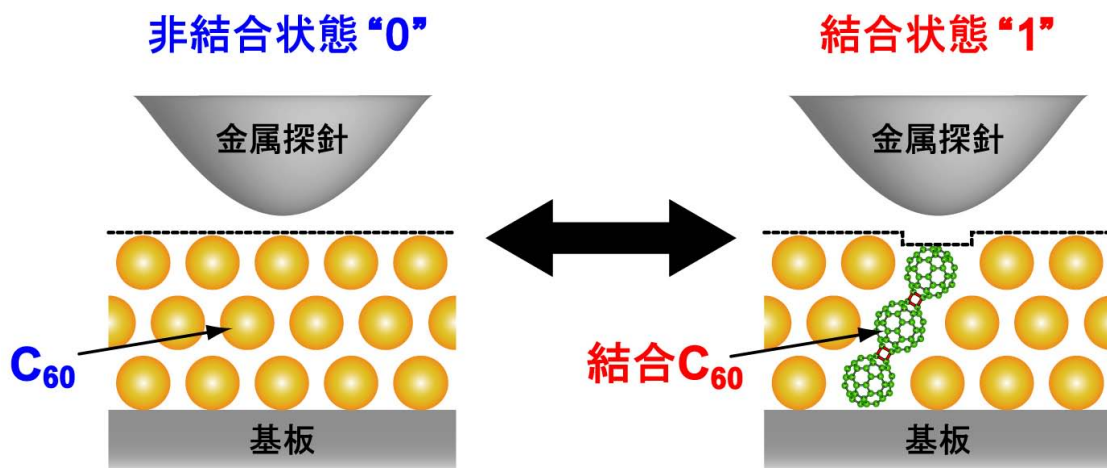


図 1. C₆₀ の非結合状態 (左側) と結合状態 (右側) を単分子スケールで制御する方法。まず、狙った C₆₀ 分子上へ先鋭化された金属針を距離 1 ナノメートル未満まで接近させる。その状態で、基板側へ負の電圧を印加すると、金属針直下の C₆₀ 分子が近接分子と化学結合する (左側→右側)。逆に、基板へ正の電圧を印加すると、分子間結合が解消し、非結合状態へ戻る (右側→左側)。

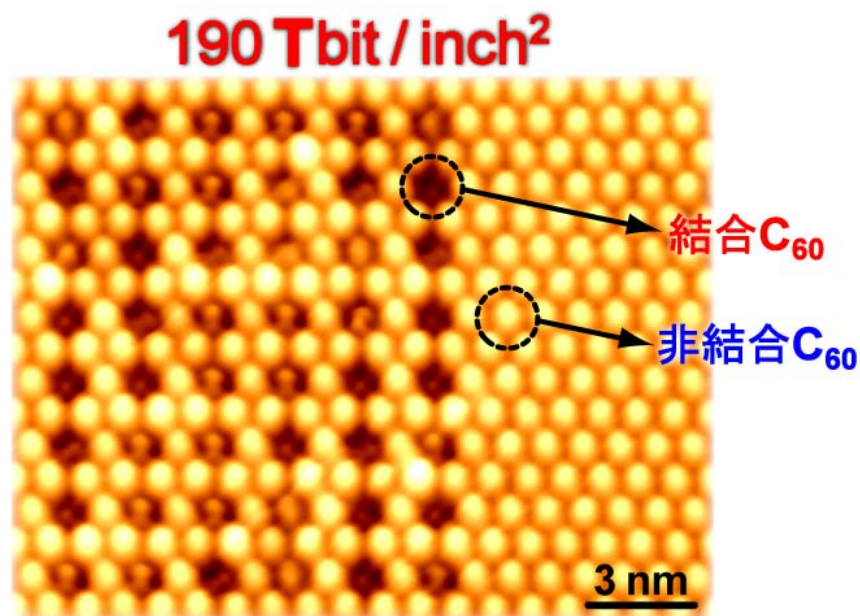


図 2. デジタル情報が超高密度に記録された C₆₀ 超薄膜 (走査トンネル顕微鏡像)。図中の明るいコントラストの分子が非結合状態にある C₆₀ 単分子に相当する。また、結合状態にある C₆₀ 分子は幾何学的に沈降しているため (図 1 の右側参照)、暗く観察される。蓄積密度は 190 テラビット毎平方インチである。

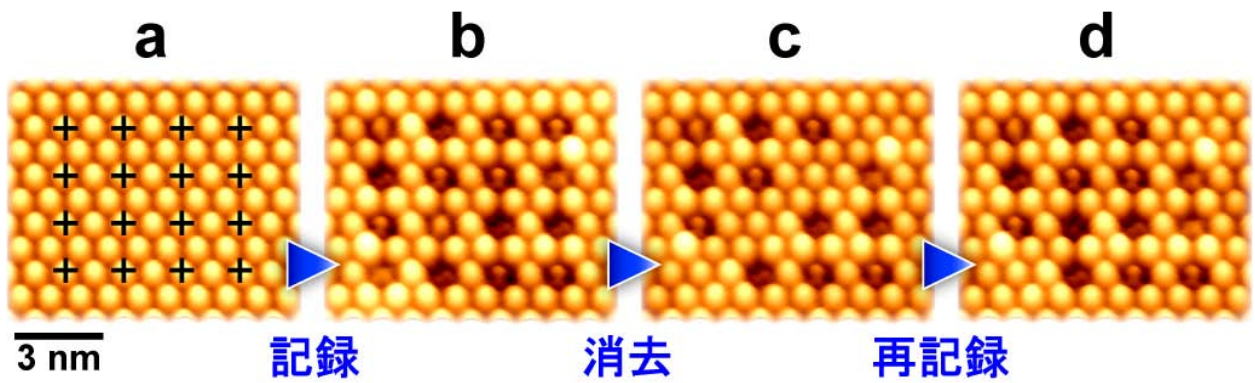


図 3. C_{60} 超薄膜へのデジタル情報の記録 (a→b)、消去 (b→c)、再記録 (c→d)。デジタル情報の蓄積密度は 190 テラビット毎平方インチである。

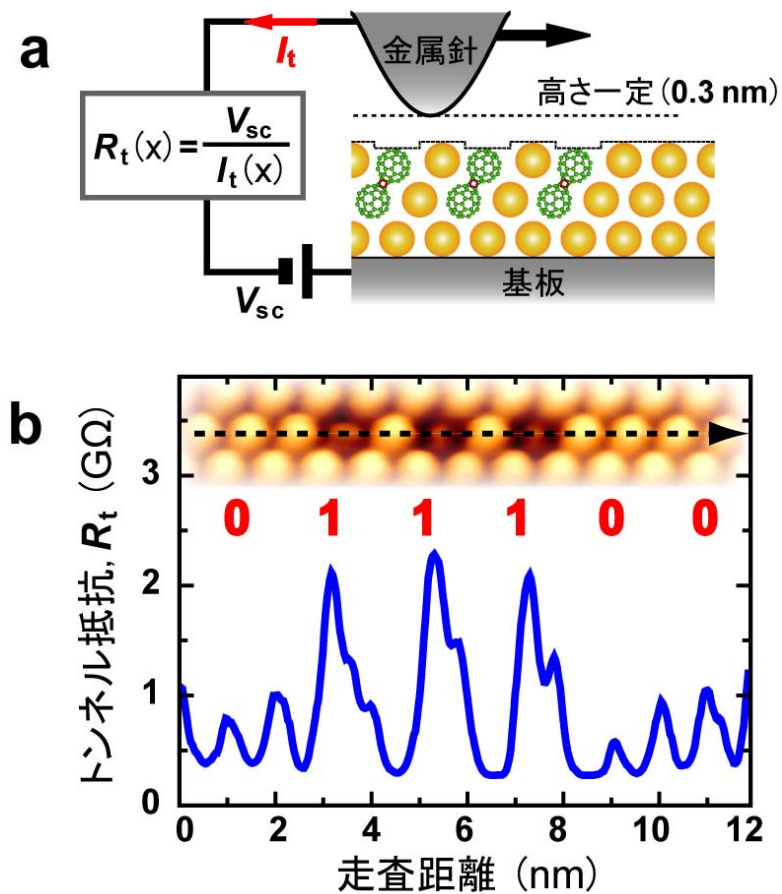


図 4. 記録情報の読み出し方法と実証例。

a; 蓄積した情報を電氣的に読み出す方法。一定電圧 V_{sc} を印加しながら探針高さ一定でライン走査し、各位置でのトンネル抵抗 $R_t(x) = V_{sc} / I_t(x)$ を計測する。

b; a の方法でトンネル抵抗の空間分布を検出した一例。“1”状態および“0”状態が、それぞれ高抵抗および低抵抗のピークとして識別されている。