

■S2 群 (ナノ・量子・バイオ) -2 編 (ナノエレクトロニクス)**7 章 新材料ナノエレクトロニクス**

(執筆者：横山直樹) [2010年2月 受領]

■概要■

シリコンや III-V 族化合物といった従来材料以外の、新たな材料を用いたエレクトロニクスが現在注目されている。新材料の導入の目的は単にデバイスの高性能化だけではなく、低消費電力化、低コスト化、あるいは新機能の付加など多岐にわたる。先立つ章で、既にカーボン材料、有機材料などを取りあげたが、この章では更に、金属酸化物材料、ナノ粒子、分子などを用いた新たなナノエレクトロニクスの動きについて概説する。

金属酸化物材料は、多結晶焼結体が古くからセンサやコンデンサの構成材料として使われてきたほか、透明で電気伝導率もある程度制御できるため、透明電極材料としても利用されている。近年は更に、ZnO などが薄膜トランジスタのチャネル材料として注目されている。これら材料は、ありふれていて安価であるとともに、薄膜トランジスタ材料の現在の主流である非晶質シリコンに比べて一桁以上高い移動度をもつため、大型ディスプレイなどへの応用が期待されている。酸化物材料は、更に磁性半導体としての可能性が追求されているほか、超巨大磁気抵抗効果、電場誘起による金属絶縁体転移、強誘電性と強磁性の共存など興味深い現象も見出されており、新たなデバイス創出への期待も大きい。7-1 節ではこのような金属酸化物材料について説明する。

ナノ粒子を利用したエレクトロニクスは、ナノ粒子ならではの性質を用いようとするもの、ナノ粒子をバルク材料のビルディングブロックとするもの、に大別される。前者としては、ナノ粒子を利用した不揮発性メモリ、単電子トランジスタなどがあげられる。後者としては、ナノ粒子を高速で基板に吹き付けることによる、金属配線やセラミック膜の低温・高速形成があげられ、プリントエレクトロニクスへの応用も期待されている。7-2 節では、このようなナノ粒子のエレクトロニクス応用の動向について説明する。

半導体デバイスの集積度の増大は、トランジスタなどの構成要素の微細化によって達成されてきた。その微細化の究極は、分子、原子レベルのサイズを扱うものとなるであろう。このようなエレクトロニクスのうち、単一分子を構成要素とするようなものを、分子エレクトロニクスと呼ぶ。ただしこれは狭義の定義であり、複数の分子や分子群、金属電極やナノワイヤまで構成要素として含めることがむしろ一般的である。このような分子エレクトロニクスは、現在の微細化に用いられているトップダウンの手法ではなく、ボトムアップ的手法で実現されるものと期待されている。7-3 節では、分子エレクトロニクスとしてこれまで研究されてきた、整流器、配線、メモリ、スイッチ/トランジスタ、負性抵抗について、その構成と動作メカニズムを概説する。

■S2 群-2 編-7 章

7-1 酸化物材料

(執筆者：川崎雅司) [2009年9月受領]

金属酸化物のエレクトロニクス応用は、多結晶焼結体を用いたセンサやコンデンサなど個別デバイスが主であった。1986年に発見された高温超伝導以降、基本素子であるジョセフソン接合を形成するために、また高温超伝導の天然の層状構造を模倣した原子層積層人工物質への期待が高まり、酸化物を原子レベルで制御した薄膜技術が進歩した。単結晶基板の表面制御技術の開発により、初めて原子層ごとの積層が可能になり¹⁾、最近ではMBE技術の進展も著しく²⁾、化合物半導体並みの結晶成長制御が可能になっている。ここでは将来の実用化を狙う酸化物半導体と強相関酸化物について概説する。

7-1-1 酸化物半導体

酸化物半導体はバンドギャップが3.3 eV程度と大きく透明であり、元素置換による化学ドーピングにより 10^3 Scm^{-1} 以上の導電性を付与できるため、古くから透明導電膜として利用されてきた³⁾。金属イオンの空のs軌道が価電子帯を形成するZnO、 In_2O_3 、 SnO_2 、 Ga_2O_3 に加え、空のd軌道をもつ TO_2 や SrTiO_3 もこの範疇と考えられる。上記の薄膜技術の進歩により、透明酸化物半導体の結晶成長にも著しい進歩があった。励起子光物性の研究対象であったZnOを高品質なエピタキシャル薄膜とすることで、室温で低閾値の紫外レーザ発振が実証され⁴⁾、紫外発光ダイオードやレーザを旨とした研究が活発化し、天然にはn型となってしまうZnOのp型化と紫外発光ダイオードが実証された⁵⁾。また、極性結晶であるウルツ鉱型結晶は自発分極をもち、バンドギャップをより広めた(MgZn)Oとの界面には自発分極の不整合から自発的な二次元電子ガス(2DEG: Two Dimensional Electron Gas)が誘起される。この2DEGでは、酸化物で初めてとなる量子ホール効果が観測され⁶⁾、化合物半導体並みのデバイス設計が可能になるレベルにきている。

一方で、薄膜トランジスタへの応用も活発に研究されている。液晶ディスプレイで用いられている非晶質シリコンは移動度が $0.5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 程度であるが、デバイス構造や材料をそのままにチャンネルだけを多結晶ZnOに置き換えた透明トランジスタの移動度が $7 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ に達し大きな注目を浴びた⁷⁾。しかし、多結晶チャンネルの粒界がトランジスタ特性に与える影響も明らかとなった。酸化物では、構成元素を多数混ぜることによって容易に非晶質(ガラス)化することが知られている。 In_2O_3 、 Ga_2O_3 、ZnOを混ぜた非晶質薄膜を用いることで、粒界の影響がない高品質な薄膜トランジスタが可能になることが報告され⁸⁾、産業界で大きな話題となり、カラーの動画が出る液晶パネルが試作されるに至っている。

上記の、光デバイスや電子デバイス応用に加え、磁性半導体としての可能性を追求する研究も進展している。Coをドーピングした TiO_2 が室温で強磁性となることが報告され⁹⁾活発な研究の切っ掛けとなった。一方で、強磁性を薄膜試料の磁化のみを証拠として主張する論文が多数報告され大きな混乱を招いた。強磁性半導体の立証には、磁性不純物が母体半導体のバンド構造を変調して自由キャリアが長距離磁気秩序を媒介する証拠を示す必要がある。Coをドーピングした TiO_2 では紫外・可視領域の強磁性的な磁気光学効果に加え、異常ホール効果も明瞭に観測されている。まだ200 K程度以下でしか動作していないが、磁気トンネル接合も

実証され、今後室温動作強磁性半導体デバイスの実証が待たれる¹⁰⁾。

7-1-2 強相関酸化物

高温超伝導から派生した大きな物性物理の潮流は、バンド幅が狭く電子の斥力が大きいため絶縁体(モット絶縁体)となってしまう遷移金属酸化物の金属絶縁体転移とそのデバイス応用の可能性である。固体中を波として自由に動く一体近似が可能な電子とは対極にあり、多体効果が顕わになる粒としての電子は、その電荷だけでなくスピンや軌道の属性が物性を理解するうえで重要となる¹¹⁾。磁場を印加すると抵抗が何桁も減少する超巨大磁気抵抗効果は、電子のスピン属性をチャンネルとして金属絶縁体転移を制御した例であった。この金属状態では、スピン偏極率が100%のハーフメタルとなり、磁気トンネル接合が実証されている。

磁場以外にも、光や格子ひずみなどを入力として金属絶縁体転移が制御でき、光誘起相転移の研究によりその時定数がpsオーダーであることが実証され、電子の軌道の自由度を制御する新しいエレクトロニクスが提案されている¹²⁾。また、電場誘起による金属絶縁体転移は、抵抗変化型不揮発性メモリの可能性があり活発に研究が行われている¹³⁾。

一方で、強誘電性と強磁性の性質を併せもつ物質(マルチフェロイクス)が大きな注目を浴びている。電場で磁化を、磁場で電気分極を制御でき、省エネルギー型論理回路を実現する可能性がある。これらの物質群でも、電子の軌道とスピンの自由度が強く結合した結果、強誘電性と強磁性が共存することが分かっている¹⁴⁾。マルチフェロイクスの強誘電性に代えて薄膜界面で生じる反転対称性の破れを用いる提案もなされている。ここでは、磁化と電気分極の外積にあたるトロイダルモーメントを光学的に検出することに成功している¹⁵⁾。

■参考文献

- 1) M. Kawasaki, K. Takahashi, T. Maeda, R. Tsuchiya, M. Shinomori, O. Ishiyama, T. Yonezawa, M. Yoshimoto, and H. Koinuma. *Science* 266, pp.1540-1542, 1994.
- 2) D. G. Schlom, L.-Q. Chen, X.-Q. Pan, A. Schmehl, and M. A. Zurbuchen, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol.91, pp.2429-2454, 2008.
- 3) T. Minami, *Semicon. Sci. Technol.*, vol.20, pp.S35-S44, 2005.
- 4) Y. Segawa, A. Ohtomo, M. Kawasaki, H. Koinuma, K. Z. Tang, P. Yu, and G. K. L. Wang, *Phys. State Sol.*, vol.B202, pp.669-672, 1997.
- 5) A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Sumiya, K. Ohtani, S. F. Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, H. Koinuma, and M. Kawasaki, *Nature Mater.*, vol.4, pp.42-46, 2005.
- 6) A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Kita, Y. Ohno, H. Ohno, and M. Kawasaki, *Science*, vol.315, pp.1388-1391, 2007.
- 7) J. Nishii, F. M. Hossain, T. Aita, Y. Ohmaki, S. Kishimoto, T. Fukumura, Y. Ohno, H. Ohno, S. Takagi, K. Saikusa, I. Ohkubo, A. Ohtomo, F. Matsukura, H. Koinuma, and M. Kawasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.L347-L349, 2003.
- 8) K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, vol.432, pp.488-491, 2004.
- 9) Y. Matsumoto, M. Murakami, T. Shono, T. Hasegawa, T. Fukumura, M. Kawasaki, P. Ahmet, T. Chikyo, S. Koshihara, and H. Koinuma, *Science*, vol.291, pp.854-856, 2001.
- 10) T. Fukumura, H. Toyosaki, K. Ueno, M. Nakano, and M. Kawasaki, *New J. Phys.*, vol.10, 055018-1-13, 2008.
- 11) Y. Tokura, *Phys. Today*, vol.56, no.7, pp.50-55, 2003.
- 12) Y. Tokura and N. Nagaosa, *Science*, vol.288, pp.462-468, 2000.
- 13) A. Sawa, *Materials Today*, vol.11, no.6, pp.28-36, 2008.
- 14) 永長直人, 十倉好紀, *日本物理学会誌*, vol.64, pp.413-420, 2009.
- 15) H. Yamada, Y. Ogawa, Y. Ishii, H. Sato, M. Kawasaki, H. Akoh, and Y. Tokura, *Science*, vol.305, pp.646-648, 2004.

■S2 群-2 編-7 章

7-2 ナノ粒子

(執筆: 佐藤信太郎) [2009年10月 受領]

7-2-1 はじめに

ナノ粒子をエレクトロニクス材料として利用する動きが近年見られている。その動きは大きく二つに分けることができる。一つはナノ粒子ならではの性質を用いようとしているもの、もう一つは所望のバルク材料のビルディングブロックとしてナノ粒子を利用するものである。前者としては、ナノ粒子を利用したメモリ¹⁾⁻³⁾、単電子トランジスタ、LSI用低誘電率膜⁴⁾などがあげられる。単一電子トンネリング現象は初期の頃はナノ粒子の2次元アレイを使って研究されており⁵⁾、その意味でナノ粒子との縁は深い。本編の1章1-3節に説明されているためここでは割愛する。本節では、これらのうちメモリ応用に絞って概説を行う。

ナノ粒子をビルディングブロックにする代表的な例は、金属ナノ粒子を利用した電極、配線の形成である。粒子をガスとともに基板に高速に吹き付けることにより、金属膜や強誘電体膜などを低温で形成する技術が最近注目されている⁶⁾⁻⁸⁾。また、金属ナノ粒子の“インク”を用いると、インクジェットなどの印刷法により、低温・低コストで配線などを形成できることが報告されており、いわゆるプリンテッドエレクトロニクスの中心技術として注目されている⁹⁾⁻¹¹⁾。後半では、これらの技術について概説する。

7-2-2 ナノ粒子のメモリ応用

ナノ粒子を利用したフラッシュメモリはナノクリスタルフラッシュメモリと呼ばれ、1995年頃にシリコンナノクリスタルを利用したメモリが提唱されて以来¹²⁾、精力的に研究されている。その基本的な構造を図7・1に示す。現状のフラッシュメモリでは、微細化に伴ってトンネル酸化膜の膜厚が薄くなると、リーク電流が増大するという問題がある。複数のナノクリスタルを浮遊ゲートとして用いると酸化膜の一部に欠陥があってもリークが抑えられるため、酸化膜を更に薄くすることにより駆動電圧を下げることができると期待されている。

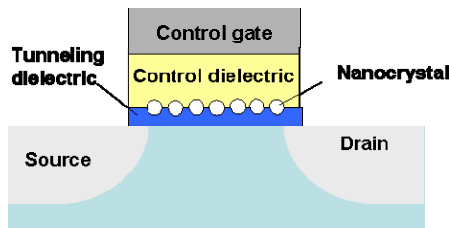


図7・1 ナノクリスタルフラッシュメモリの基本構造

メモリ用のナノクリスタルのサイズとしては、5~6 nm、あるいはそれ以下が必要である。シリコンナノクリスタルの最も典型的な作成法は、シランガスの熱分解による酸化膜上への直接合成である¹²⁾。この方法で形成されたナノクリスタルは半球状であり、 10^{12} cm^{-2} を超える密度のものが比較的容易に得られる。その他の生成法としては、気相でシリコンナノ粒子を形成して基板に吹き付ける方法¹³⁾、ポリマーのテンプレートを使って形成する方法¹⁴⁾な

どが提案されている。ナノクリスタル材料としては、ゲルマニウムや、金・ニッケル・プラチナなどの金属も提案されている¹⁵⁾。金属ナノクリスタルは金属薄膜のアニールによって得られるが、高い状態密度や強いチャネルとのカップリングなどからより良い特性が期待されている。ナノクリスタルフラッシュメモリは 32 nm 世代での実現が期待されている¹⁵⁾。

7-2-3 ナノ粒子をビルディングブロックとした薄膜形成

ナノ粒子あるいはマイクロ粒子をビルディングブロックとした薄膜は、比較的低温で多結晶膜の形成が可能で、成膜速度が速いことなどから次第に応用が広がりつつある。ナノ粒子による薄膜堆積は、創造科学技術推進事業の「林超微粒子プロジェクト(1981~1986年)」によって先駆的な研究がなされた^{6), 8)}。成膜法としては、蒸発凝集法で形成した微粒子を低圧下でガスとともに数 10~数 100 m/s 程度の速度で基板で吹き付ける方法、予めパウダを用意し、それをエアロゾル化して基板に吹き付ける方法がある。前者は金属膜の形成に有効であり、金、銀、ニッケル、銅、鉛、アルミ、すずにおいて、それぞれの単結晶に対して 1.2~2.4 倍の比抵抗をもつ良質な膜が得られている⁹⁾。

パウダを窒素などのキャリアガスとともに低圧下で基板に吹き付けることによるセラミック膜の形成が 2000 年頃から盛んになり⁸⁾、エアロゾルでポジション法、という名称で呼ばれている。通常良質のセラミック膜の形成には 1000°C 程度、あるいはそれ以上の高温処理が必要であるが、エアロゾルデポジション法によれば、室温のような低温で緻密な膜を形成することができる。強誘電体膜である PZT や PLZT の膜も形成可能であり⁸⁾、アクチュエータや光変調器への応用が試みられている。更に、チタン酸バリウム膜の低温形成により、熱に弱いプリント基板上へのキャパシタの直接形成なども行われている¹⁶⁾。

インクジェット方式を利用し、金属のナノ粒子インクを基板に堆積することによる微細配線の形成も研究が進められている。Fuller らは、 α -テルピネオールに分散された金、あるいは銀のナノ粒子(サイズ:5~7 nm)をピエゾ方式のインクジェットノズルで基板に吹き付け、300°C でアニールすることにより、配線、電極、MEMS デバイスなどを作成した⁹⁾。また、Huang らはヘキサランに分散する金ナノ粒子の大きさや、ナノ粒子を覆うアルカンチオールの長さを調節することにより、プラスチック基板に適用可能な処理温度(150°C 以下)で電極や配線の形成に成功した。この場合、導電率は最大でバルクの 70% にも達した¹⁰⁾。これらの研究での線幅は 100 ミクロン程度とかなり太いものであったが、村田はインクジェット方式を改善し、線幅が数ミクロン以下の金属配線の形成に成功した¹¹⁾。村田は更に改善を続け、最近ではインクジェットによる線幅 1 ミクロンの配線形成に成功している。

7-2-4 おわりに

ここで紹介したように、ナノ粒子のエレクトロニクス応用は徐々に進みつつある。特に近年盛んになってきているプリンテッドエレクトロニクスの分野では、電極・配線形成を中心にナノ粒子の重要性は更に高まっていくものと考えられる。またここでは紹介できなかったが、ナノ粒子を利用したトランジスタチャネルの形成も試みられており、今後ナノ粒子のエレクトロニクス応用のさらなる進展が期待される。

■参考文献

- 1) A. Nakajima, et al., "Isolated Nanometer-Size Si Dot Arrays Fabricated Using Electron-Beam Lithography, Reactive Ion Etching, and Wet Etching in NH₄OH/H₂O₂/H₂O" Jpn. J. Appl. Phys. vol.33 pp.L1796-L1798 (1994); A. Nakajima et al., "Room temperature operation of Si single-electron memory with self-aligned floating dot gate" Appl. Phys. Lett. vol.70, pp.1742-1744, 1997.
- 2) S. Tiwari, et al., "Volatile and Non-Volatile Memories in Silicon with Nano-Crystal Storage," Tech. Dig. of International Electron Devices Meeting, pp.521-524, 1995; S. Tiwari, et al., "A silicon nanocrystals based memory," Appl. Phys. Lett. vol.68, no.10, pp.1377-1379, 1996.
- 3) J. Blauwe, "Nanocrystal nonvolatile memory devices," IEEE Trans. Nanotechnology, vol.1, no.1, 2002
- 4) M. Ikeda et al., "A highly reliable nano-clustering silica with low dielectric constant ($k < 2.3$) and high elastic modulus ($E = 10$ GPa) for copper damascene process," Proc. of IEEE International Interconnect Technology Conf., pp.71-73, 2003.
- 5) Zeller and Giaever, "Tunneling, zero-bias anomalies, and small superconductors," Phys. Rev., vol.181, no.2, pp.789-799, 1969.
- 6) S. Kashu et al., "Deposition of Ultrafine particles using a gas jet," Jpn. J. Appl. Phys., vol.23, no.12, pp.L910-L912, 1984.
- 7) J. Akedo and M. Lebedev, "Microstructure and electrical properties of lead Zirconate Titanate (Pb(Zr₅₂/Ti₄₈)O₃) thick films deposited by aerosol deposition method," Jpn. J. Appl. Phys., vol.38, pt.1 9B, pp.5397-5401, 1999.
- 8) 淵田英嗣, "ナノ粒子を利用したガスデポジション成膜装置とその応用," エアロゾル研究, vol.22, no.1, pp.26-33, 2007.
- 9) S. Fuller, E. Wilhelm, and J. Jacobson, "Ink-jet printed nanoparticle microelectromechanical systems," J. Microelectromech. Syst., vol.11, no.1, pp.54-60, 2002.
- 10) D. Huang, et al., "Plastic-compatible low resistance printable gold nanoparticle conductors for flexible electronics," J. Electrochem. Soc., vol.150, no.7, pp.G412-G417, 2003.
- 11) K. Murata, "Super-fine ink-jet printing for nanotechnology," Proc. International Conf. on MEMS, NANO and Smart Systems, pp.346-349, 2003.
- 12) Y. Shi, et al., "Silicon nano-crystals based MOS memory and effects of traps on charge storage characteristics," Proc. International Conf. on Solid-State and Integrated Circuit Technology, pp.838-841, 1998.
- 13) M. Ostraata, et al., "Synthesis and characterization of aerosol silicon nanocrystal nonvolatile floating-gate memory devices," Appl. Phys. Lett., vol.79, no.3, pp.433-455, 2001.
- 14) K. Guarini, et al., "Low voltage, scalable nanocrystal flash memory fabricated by templated self assembly," Tech. Dig. of International Electron Devices Meeting, pp.541-544, 2003.
- 15) C. Sandhya et al., "Recent advances in charge trap flash memories," Proc. 2nd International Workshop on Electron Devices and Semiconductor Technology, pp.1-5, 2009.
- 16) Y. Imanaka and J. Akedo, "Integrated RF Module Produced By Aerosol Deposition Method," Proc. 54th Electronic Components and Technology Conf., pp.1641-1621, 2004.

■S2 群-2 編-7 章

7-3 分子エレクトロニクス

(執筆者：居城邦治・松尾保孝) [2009年3月 受領]

集積回路がムーアの法則に従い集積密度を増大させるためには構成要素（ダイオード、トランジスタなど）のサイズを減少させる必要がある。究極的には原子・単分子レベルで動作する集積回路が Feynman によって言及されており、分子エレクトロニクスはそれを実現する技術となる。分子エレクトロニクスは狭義には単一分子のみを用いた技術であるが、通常は単一分子・分子群、電気特性を実行するために必要な金属・半導体ナノワイヤまでを含めたデバイスと定義することができる。

本節ではこれまでに研究された整流器、配線、メモリ、スイッチ/トランジスタ、負性抵抗について分子系とそのメカニズムを構成要素ごとに説明する。

7-3-1 分子整流器

初めての分子エレクトロニクス素子として 1970 年代に理論的・実験的な研究が行われ、pn 接合を模倣した分子構成が考えられた。Aviram と Ratner らはドナー (D) とアクセプター (A) をアルキル鎖などのリンカー分子で結合した D-A 分子を提唱し¹⁾、HOMO あるいは LUMO のエネルギー準位が適切であれば電子移動で整流作用を示すことを報告した。一方、Pomerantz らは銅フタロシアニンを酸化した高配向性結晶黒鉛 (HOPG) 基板上に結合させることで D-A 型でなくとも整流作用が発現することを見出ししている²⁾。これは STM 探針のフェルミ準位と銅フタロシアニスが結合した HOPG 基板の状態密度が共鳴し、トンネル電流が生じるためだと考えられる³⁾。単一分子系以外では π 電子系で結合した両性イオン型 D-A 分子を Langmuir-Blodgett (LB) 膜として積層し、アルミ電極で挟み込むことによって整流作用が生じることが Metzger らによって報告されている⁴⁾。

7-3-2 分子配線

主に共役分子系を中心に研究され、代表的な分子としてポリチオフェンがあげられる。ポリチオフェンの一部を酸化あるいは還元することで導電性をもたせることができる⁵⁾。その他には Crossley らが合成した直線的に平面的なポルフィリンを結合した分子アレイがあげられる⁶⁾。置換基や結合に用いる分子の特性を考慮して π 電子系をいかに非局在化させるかが導電性をもたせるために重要となっている⁷⁾。最近、期待されている分子として単層カーボンナノチューブがある。合成方法が改善され、材料として十分な収量が得られることから構造 (キラリティーや直径) と電子特性の相関について詳細な研究が進められている⁸⁾。

7-3-3 分子メモリ

分子メモリは静的な構成要素であり、0 と 1 のデータの蓄積を必要とする。分子系での実現方法は電荷の蓄積・構造変化・位置移動などが考えられる。Kwon らはナノチューブ内にフラーレンを内包した分子を作製・配列し、フラーレンの存在位置を電氣的に検出することでメモリとしての機能を実現するモデルを考案している⁹⁾。これ以外では高分子 (PMMA) の温度によるモルフォロジー変化を抵抗として検出する方法¹⁰⁾や、Roth らが示した金属ポ

ルフィリンの酸化状態を利用する方法があげられる¹¹⁾。

7-3-4 分子スイッチ／トランジスタ

分子スイッチ／トランジスタとしては単一分子、カーボンナノチューブ、量子ドットなどの量子効果を用いた素子が最も多く報告されている。スイッチとしてはフラレーンを STM 探針で歪ませることで入力電圧に対して 5 倍のゲインが出力されること¹²⁾ や、銅ポルフィリンの置換基の配向によって異なるコンダクタンスを示すことが報告されている¹³⁾。一方、トランジスタとしては Dekker らが SiO₂ 上の Pt 電極間に半導体性カーボンナノチューブを被せた FET について報告している¹⁴⁾。接触抵抗や SiO₂ 層の厚みを制御することで 10 THz の動作周波数と 3.5 倍程度のゲインを得ることが可能であると理論的には考えられている。次世代トランジスタとして研究が盛んであるのはナノギャップ電極におけるクーロンブロックードを利用する単電子トランジスタ (SET) である。Wada らはポリチオフェン鎖とメチレン鎖を組み合わせた分子トランジスタを提案している¹⁵⁾。

7-3-5 分子負性微分抵抗

負性微分抵抗 (NDR) は印可電圧の上昇に伴い電流が減少する特性であり、エサキダイオードなどに用いられている¹⁶⁾。分子系では Reed と Tour らがニトロ基とアミノ基をもつ分子を電極間に挟み込むことだ素子で強い NDR が生じることを報告している¹⁷⁾。これは分子内の一つの官能基が還元されることで分子内へ電流を流し、更に連続的な電流通過で二つ目の官能基が還元される二段階反応により NDR が生じたと考えられている。一方、フェロセンを末端に修飾したドデカンチオール SAM 膜を金基板上に作製することで NDR が観測されている¹⁸⁾。これはフェロセンの酸化還元準位が共鳴トンネル効果を引き起こして生じると考えられる。

■参考文献

- 1) A. Aviram and M. A. Ratner, Chem. Phys. Lett., vol.29, 277, 1974.
- 2) A. Aviram, C. Joachim, and M. Pomerantz, Chem. Phys. Lett., vol.146, 490, 1988.
- 3) M. Pomerantz, A. Aviram, R. A. McCorkle, L. Li, and A. G. Schrott, Science, vol.255, 1115, 1992.
- 4) A. S. Martin, J. R. Sambles, and G. J. Ashwell, Phys. Rev. Lett., vol.70, 218, 1993.
- 5) K. Müllen and G. Wegner, "Electronic Materials: The Oligomer Approach," Wiley-VCH, Weinheim, 1998.
- 6) M. J. Crossley and P. L. Burn, J. Chem. Soc. Chem. Commun., 1569, 1991.
- 7) J. R. Reimers, L. E. Hall, M. J. Crossley, and N. S. Hush, J. Phys. Chem. A, vol.103, 4385, 1999.
- 8) M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, and P. Avouris, "Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications," Springer, Berlin, 2001.
- 9) Y. K. Kwon, D. Tomanek, and S. Iijima, Phys. Rev. Lett., vol.82, 1470, 1999.
- 10) G. Binnig, M. Despont, U. Drechsler, W. H. Bernerle, M. Lutwyche, P. Vettiger, H. J. Mamin, B. W. Chui, and T. W. Kenny, Appl. Phys. Lett., vol.74, 1329, 1999.
- 11) K. M. Roth, N. Dontha, R. B. Dabke, D. T. Gryko, C. Clausen, J. S. Lindsey, D. F. Bocian, and W. G. Kuhr, J. Vac. Sci. Technol. B, vol.18, 2359, 2000.
- 12) C. Joachim and J. K. Gimzewski, Chem. Phys. Lett., vol.265, 353, 1997.
- 13) F. Moresco, G. Meyer, K. H. Rieder, H. Tang, A. Gourdon, and C. Joachim, Phys. Rev. Lett., vol.86, 672, 2001.
- 14) S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, and C. Dekker, Nature, vol.393, 49, 1998.
- 15) Y. Wada, Pure Appl. Chem., vol.71, 2055, 1999.

- 16) S. M. Sze, “ Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed.,” Wiley, New York, 1981.
- 17) J. Chen, M. A. Reed, A. M. Rawlett, and J. M. Tour, Science, vol.286, 1550, 1999.
- 18) C. B. Gorman, R. L. Carroll, and R. R. Fuierer, Langmuir, vol.17, 6923, 2001.