

ナノ構造技術

ナノ構造技術、ナノテクノロジーは、物質をナノメートルスケール (10^{-9} m) で制御して発現する多様な機能とその応用を取り扱う分野で、物質開発とデバイス作製に関する究極のテクノロジーであり、新しいサイエンスを生み出す場でもある。本稿では、2010年3月に応用物理学会が作成したアカデミック・ロードマップおよび発展史マップに基づき、ナノ構造技術における将来ビジョンを同分野の発展史も含めながら概観する。ナノ構造技術の将来ビジョンのメインマップでは、①デバイス・プロセス、②ナノ計測、③ナノ材料の3分野に分けてその将来展望を記述している。またメインマップに加えて、それぞれの分野に対応して、「ナノ構造技術の発展」、「ナノ構造作製・評価技術 (SPM) の発展」、「カーボンナノチューブ技術の発展」と題する3枚のサブマップを作成している。本稿ではこれらの分野の展望を簡単に述べる。

Keywords : nanostructure, nanotechnology, bottom-up technology, top-down technology, quantum effect, scanning probe microscope, carbon nanotube, graphen

1. ま え が き

物質の性質はその組成と構造で決まる。原子の種類はたかだか100程度であるが、原子配列構造をナノメートルスケール (10^{-9} m) で組織化すると未知の多様な機能が発現する。したがってナノテクノロジーは、物質開発と作製に関する究極のテクノロジーであり、新しいサイエンスを生み出す場であるともいえる。一方でナノ構造技術やナノテクノロジーと呼ばれる分野は、さまざまな技術が相互に関連しながら発展してきた分野であり、対象となる技術は広範囲にわたっている。歴史的に見れば、ナノサイズでの特異な物性と技術的応用の大きな可能性を語ったフラインマンによる1959年のアメリカ物理学会での講演¹⁾がナノテクノロジーの概念を最初に示したものであるといわれている。その後、江崎らによる超格子構造の提案²⁾、半導体のエピタキシャル成長技術やリソグラフィの微細加工技術の発展などにより実験的検証が進み、ナノサイズ特有な物性や現象が発現することが認識されるようになり、量子井戸や量子細線、量子ドットといった低次元系への展開^{3,4)}と、高移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor: HEMT)⁵⁾などのデバイスへと応用されるに至った。さらに走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope: STM) の発明⁶⁾とそれを用いた原子操作⁷⁾などの研究が注目を集めた。近年では、リソグラフィ、成膜技術・エッチング技術、微細加工技術などによるトップダウン型の技術ばかりでなく、原子や分子からナノ構造を構築していくボトムアップ型の技術の構築も進められている。またカーボンナノチューブやグラフェンなどのナノ構造材料の研究も活発である。

このような歴史と現状を踏まえて、今回ナノ構造技術の将来ビジョン⁸⁾と技術発展史⁹⁾のマップを作成した。発展史マップの作成にあたっては、概念、形成技術、ナノ構造作製例 (デバイス)、計測技術、ナノ構造材料に分けて、目立った技術が発表された年代を大まかに示し、関連する参考論文をあげた。これらのマップの作成にあたっては、本稿の最後に列挙した応用電子物性分科会、薄膜・表面物理

分科会、および励起ナノプロセス研究会からそれぞれ数名の方々にご尽力いただいた。将来ビジョンのロードマップは2008年3月に作成した第1版と同様である。本稿では、ビジョンマップを中心にナノ構造技術の現状と将来展望について要約を述べてみたい。

2. ナノ構造技術のビジョンマップ⁹⁾

ナノ構造が生み出すデバイスは、従来技術の延長としての高性能化・高速化・大容量化と、ナノ構造で初めて現れる現象・原理の導入という二つの要因により特徴づけられる。ナノ構造領域に入ると、さまざまな形で量子効果が発現し、量子状態を制御するデバイスが現実のものとなる。また将来は、生体分子・有機分子と半導体素子の融合が進み、単分子デバイスやバイオデバイスが新たに登場すると期待される。このような予測を基に、ナノ構造技術の将来ビジョンメインマップは①ナノデバイス・プロセス、②ナノ計測、③ナノ材料の3分野に分けて、その将来展望を記述した (図1)。またメインマップに加えて、それぞれの分野に対応して、「ナノ構造技術の発展」、「ナノ構造作製・評価技術 (SPM) の発展」、「カーボンナノチューブ技術の発展」と題する3枚のサブマップも作成している。

①ナノデバイス・プロセス技術

ナノ構造技術やナノテクノロジーの分野では、リソグラフィや微細加工技術、極薄膜成長技術などを駆使して微細構造を作製する手法をトップダウン型、原子や分子レベルから新しい機能をもつナノ構造を構築しようとする手法をボトムアップ型のアプローチと呼んでいる。トップダウン型の典型例はシリコン集積回路である。近年では限界も議論されてはいるが、今後も素子の微細化による高性能化、高速化、高集積化が進んでいくであろう。International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) 2009によると、2009年では高性能論理回路用のMOSFET (金属/酸化物/半導体電界効果型トランジスタ) の物理的ゲート長は29 nm、DRAM (ランダムアクセスメモリー) セルピッチの1/2は50 nmであるものが、2022年には、それぞれ8.9 nm、10 nmと予測されている。このころには10

nm以下の素子形成技術が要求され、ナノインプリント法などの新しい微細加工技術の発展などが期待される。今後もこのようなトップダウン型の手法で、超高速素子や高効率発電素子、超省電力素子などが実現されていくであろう。

一方で、生体を例に取って分子の機能を見ると、たんぱく質分子は数nm前後のスケールで非常に特異的な分子認識機能をもっている。これはトップダウンの技術では現状では不可能な機能である。したがってナノ構造技術の一つの柱は、微細加工技術と自己組織化の融合であると考えられる。将来は生体親和素子や体内診断素子、自己修復機能をもつ素子なども可能となるであろう。もちろんそのためには、原子(分子)レベルでの現象の物理的、化学的理解と高度な制御技術が必要であるが、2040年のデバイスプロセス技術においては、リソグラフィ・成膜・エッチングなどの微細加工によるトップダウン技術と、原子・分子・クラスターからナノ構造を組み上げる自己組織化的なボトムアップ技術が融合されていると期待される。

②ナノ計測技術

現在すでに走査プローブ顕微鏡(Scanning Probe Microscope: SPM)や透過電子顕微鏡の発達によって、1原子の空間分解能が達成されている。特にSTMや原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscopy: AFM)に代表されるSPM技術は、物質表面の電子状態を原子レベルで観察できるレンズを使わない新しいタイプの顕微鏡であるばかりでなく、さまざまなバリエーションによりナノ領域の物性評価技術としても利用でき、さらには原子や分子を操作できるピンセットのような役割(原子・分子マニピュレーション)を果たす加工装置としても機能することが特筆すべき点である。これらの特徴ゆえに、SPM技術はナノ構造技術の評価装置、加工装置として広く利用されている。

原子レベルのナノ構造や電子状態評価技術としては、今後STM振動分光やノンコンタクト(NC)AFMのフォースカーブ解析などにより、個々の原子・分子の識別・同定がされていくであろう。ナノ物性評価技術としては、発光特性やラマン分光を測定可能な走査型近接場光顕微鏡(Near field Scanning Optical Microscopy: NSOM)、また半導体デバイスにおける欠陥やドーパント分布を計測できる装置として走査型キャパシタンス顕微鏡(Scanning Capacitance Microscope: SCM)、電気力顕微鏡(Electrostatic Force Microscope: EFM)、誘電・強誘電特性評価や強誘電体媒体への書き込みも可能な非線形誘電率顕微鏡(Scanning Non-linear Dielectric Microscope: SNDM)なども期待される。

原子や分子のマニピュレーション機能は、SPMがもつ比類なき特長である。原子や分子を「実際に見ながら」操作しうる装置はほかにない。STMによる原子操作やNCAFMを用いた異種原子間の交換・埋め込みなどが報告されている。またSTM振動励起は単なる分光にとどまらず、原子・分子の運動制御や化学反応誘起にまで利用可能と考えられる。これら手法が確立すれば、人類の夢である「個々の原子を測定し、識別して、さらに操作して」新奇な機能をもつナノ構造やナノデバイスを作り上げる究極のボトムアップテクノロジーも可能になると期待され、SPM技術はその必須技術となるものと思われる。産業的には原子分解能とウエハースケール処理の両立が課題となるであ

らう。

③ナノ材料技術

ナノ材料技術においては、高速・高集積デバイスの進歩を支える高品質半導体材料と、特異的な機能をもつカーボンナノチューブ(CNT)、グラフェンや高分子・生体分子との相補によりブレイクスルーがもたらされると期待される。シリコンを代表とする半導体は、材料として完全性が高く、微細で高性能なデバイスの量産に適しており、今後も主役の座は揺るがないと考えられる。しかし、半導体デバイスの現在の構成要素だけでは物理的限界も存在する。一方、CNTは1nmでも安定に存在し、電流を流すことができる。また、21世紀の科学技術で重要な柱となる医療・福祉という分野では、生体との情報のやり取りを担うデバイスが必要となるであろう。ナノ構造材料の将来像は、高性能半導体の持続的発展と、自己組織化されるナノ構造材料や有機・生体分子が相補的役割を担っていくことであると思われる。

ナノ材料として現在注目されている材料にカーボンナノチューブ(CNT)とグラフェンがある。ナノ構造クラスターではCNTに関するビジョンサブマップとCNT、グラフェンに関する発展史サブマップを作成している。

CNTは直径が1nm程度と量子効果を発現するサイズでありながら、機械的に強固かつ化学的に安定で、すでに電界効果トランジスタや単電子トランジスタ、テラヘルツ高周波デバイスが実証されている。CNTの電子構造はその直径ばかりでなくチューブを構成する炭素原子の並び方(カイラリティ)に依存して変化するため、特性のそろったCNTを得ること、それを適切に配置して集積化することがデバイス応用上の課題である。このためにはCNT成長機構に関する研究の進展が不可欠である。物性の制御には、フラーレンなどをCNT内に内包させる手法も用いられる。また、CNTの機械的特性を生かしてNEMS(Nano-Electro Mechanical System)技術への展開も期待される。CNTは近い将来には多層配線をつなぐ配線ビアとして、また、有毒ガス、バイオハザード物質、ウイルスなどの生体物質を電氣的に高感度に検出する高感度センサーとして実用化される見通しである。デバイス実現のためのプロセスの課題としては、金属電極、大気などの雰囲気(外部環境)の影響から保護するパッシベーション技術、CNTトランジスタのためのゲート絶縁膜技術などがあげられる。さらに2020年ごろにCNTの特性をそろえることが可能となれば、デバイス化・集積化が加速されると期待される。

一方、グラフェンは2004年に機械剥離法によるグラフェンの形成と電界効果が報告されてから注目を集め、これまでにグラフェンの特異な物性が明かにされ、また高い移動度を利用した電子デバイスへの応用が試みられている。最近特に研究が進展しつつある分野であり、将来を予測することは難しいが、グラフェンの電子物性は、その層数や、サイズ、末端構造に依存するため、CNTと同様グラフェンにおいても合成・構造制御技術の確立がデバイス応用のために重要な課題である。機械剥離法に代わり、CVD法、SiC熱分解法や化学剥離法を実用化する試みが進められている。グラフェンは、CNTとは異なって二次元形状であるため、平面加工が中心である既存の半導体プロセスと極めて親和性が高い。上記のデバイス技術と大量合成技術の融合

により、将来の高性能・低消費電力デバイスへの展開が期待されている。

3. む す び

ナノ構造技術における将来ビジョンを、発展史も含めながら概要を解説した。ここに記した内容は2010年3月に応用物理学会が作成したアカデミック・ロードマップおよび発展史マップに記載した内容をまとめたものであり、詳細はこれらの冊子を参照していただきたい。

ここに記したように、ナノ構造技術の発展が、超高速・超高集積・超低消費電力デバイス、また超高密度・超大容量ストレージデバイスなどを生み出し、ユビキタス社会を牽引して、さらには環境・エネルギー問題解決への貢献を担うものと思う。将来の高度情報化社会、高度安全社会へ向け、人間とのインターフェースを重視しながら、ナノ構造デバイス技術が花開き、医療・福祉・安心社会への新しい基盤を提供するものと期待する。

文 献

- 1) R. P. Feynman: "There's Plenty of Room at the Bottom" <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- 2) L. Esaki, and R. Tsu: "Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors" IBM Res. Note RC-2418 (1969).
- 3) H. Sakaki: Jpn. J. Appl. Phys. **19**, L735 (1980).
- 4) Y. Arakawa and H. Sakaki: Appl. Phys. Lett. **40**, 939 (1982).
- 5) T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fujii, and K. Nanbu: Jpn. J. Appl.

Phys. **19**, L225 (1980).

- 6) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: Phys. Rev. Lett. **49**, 57 (1982).
- 7) D. M. Eigler and E. K. Schweizer: Nature **34**, 524 (1990).
- 8) 「応用物理分野のアカデミック・ロードマップ (改訂版)」2010年3月, 応用物理学会.
- 9) 「応用物理分野の発展史マップ」2010年3月, 応用物理学会.

ナノ構造技術クラスター/アカデミック・ロードマップ (将来ビジョン) <応用電子物性分科会> 荻野俊郎 (横国大), 山田明 (東工大), 高橋琢二 (東大), 須原理彦 (首都大), 佐野芳明 (沖電気) <薄膜・表面物理分科会> 重川秀実 (筑波大), 本間芳和 (東理大), 森田清三 (阪大), 中嶋健 (東工大), 松本和彦 (阪大), 落合幸徳 (JST), 大野雄高 (名大), 粟野祐二 (慶大), 石橋幸治 (理研) <励起ナノプロセス研究会> 篠塚雄三 (和歌山大), 村上浩一 (筑波大), 前田康二 (東大), 上田修 (金沢工大), 伊東千尋 (和歌山大)

発展史マップ<応用電子物性分科会> 徳光永輔 (東工大), 荒川太郎 (横国大), 高橋琢二 (東大), 小林慶裕 (阪大) <薄膜・表面物理分科会> 本間芳和 (東理大, 大野雄高 (名大), 佐藤信太郎 (富士通研) <励起ナノプロセス研究会> 篠塚雄三 (和歌山大), 赤澤方省 (NTT), 前田康二 (東大), 松井真二 (兵庫県立大), 渡辺精一 (北大), 奥野恒久 (和歌山大), 尾崎信彦 (和歌山大)

(2010年4月26日 受理)

