



財団法人 池谷科学技術振興財団

平成 16 年度

年報 別冊



IKETANI
SCIENCE AND
TECHNOLOGY
FOUNDATION

2005 Vol.16



3 平成 15 年度研究・調査成果報告



写真提供：独立行政法人 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所 藤田大介氏

走査トンネル顕微鏡による導電性ナノドット・ ナノワイヤ創製システム開発

独立行政法人 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所

藤 田 大 介

(昭和35年12月生)



1. 目 的

導電性ナノドット・ナノワイヤは、ナノデバイスを構成する基本回路部品として重要である。また、ナノドットやナノワイヤは、それ自体が量子力学的な効果を発現することからナノ科学の研究対象でもある。たとえば、トンネル障壁により外部回路と接続された金属ナノドットは単一電子トンネル効果 (SET) と呼ばれる量子力学的効果を発現する。SET 効果により低エネルギー消費型極微トランジスタ、分子素子、量子コンピュータへの応用が可能である。一方、導電性ナノワイヤはバリスティック電子輸送や量子化コンダクタンスなどのメソスコピック効果を発現する。

このような興味深い研究対象である導電性ナノドット・ナノワイヤの創製手法としては電子ビームリソグラフィーが従来は主流であったが、近年、走査トンネル顕微鏡 (STM) を利用した創製手法も開発されている。ここでは主に SET ナノデバイスとしての応用を想定したナノドット・ナノワイヤ創製要素技術を開発する。ナノ構造創製手法としては、位置制御性に優れた電圧パルス印加型 STM 探針物質移送法を採用した。

2. ナノ回路と創製プロセス

SET 効果は 1 つの電子がソース電極から中心

電極にトンネルすることにより微小接合の静電エネルギーが上昇し、これが電子トンネル効果を阻害する現象である。SET 現象が観察されるためには以下の条件を満足しなければならない。第一に中心電極に存在する 1 個の過剰な電子が有する静電エネルギー E_c は熱エネルギーよりも十分に大きくなければならない。第二に接合バリアのトンネル抵抗 R_T が量子抵抗 $R_K (= h/e^2 = 25.8 k\Omega)$ よりも十分に大きいことが必要である。従来法で作製される接合は $100 \times 100 \text{ nm}^2$ 程度、 C は約 10^{-16} F である。この場合の静電エネルギー E_c に相当する温度は約 10K であり、SET 現象を観測するためには極低温が必要である。一方、STM ナノ創製手法を用いた場合、10nm 級の電極を作ることが可能であり、静電容量は 10^{-19} F 程度まで小さくできる。その結果、室温動作可能な SET 素子の作製も実現できる。

創製システムとしては超高真空 (UHV) STM を用いる。Si(111) 7×7 表面のような原子レベルで清浄な表面を創製用基板とする。UHV 環境で清浄基板表面上にマスク蒸着法によりサブミクロンオーダーの電極を形成した後に、STM ナノ創製手法によりナノ構造を作製する。最終的にはナノデバイスの電気特性を測定評価することが重要であり、図 1 に示すような UHV 環境でナノ素

子創製と電気特性測定を一貫して行えるシステムを開発した。

3. STM ナノ創製

上記プロセスにより創製されたミクロな電子回路にナノ構造部分を STM ナノ創製技術により付加する。STM 探針に対して電圧パルスを印加すること（電圧パルス法）により探針物質を移送し、ナノ構造を形成することができる。われわれは1996年に Au 被覆探針を用いて Au ナノドットを Si(111) 表面に創製することに初めて成功した¹⁾。しかし、Au 探針電圧パルス法の問題点は、創製確率が約50%に留まることである。より高い確率で探針物質を表面移送できる物質として、われわれは Ag 薄膜被覆探針および純 Ag 探針を開発した²⁾。この場合、低いパルス電圧から探針物質移送が開始され、移送確率も100%に達する。その結果、ナノドット・ナノワイヤを基板表面に創製することが可能である。

高い物質移送特性を応用して Ag のナノワイヤとナノキャラクター（文字）を作製した例を図2に示す。幅10~20nm、高さ約2nmのAgナノワイヤが清浄 Si(111)-(7×7) 表面上に形成されている。表面への Ag 原子移送のメカニズムについては電界誘起拡散による点接触（ナノポイントコンタクト）モデル（図3参照）で説明できる³⁾。まず STM 探針のフィードバック回路を切断し、電圧パルスを印加する。探針先端に電界が集中することにより、電界誘起拡散が生じる。その結果、探針先端は基板表面側へ伸張し、最終的に点接触する。点接触が生じると過大な電流が流れ、接触部分の温度が上昇し、Ag 原子と基板 Si 原子との強固な結合が形成される。電圧パルス終了後、フィードバック回路が回復し、探針はフィードバック電流に戻るまで後退する。Ag 原子と Si 原子との結合が強い場合は、探針物質は基板側へ取り残され、Ag ナノドットが創製される。このモデルは、デジタルオシロスコープにより電圧パルス印

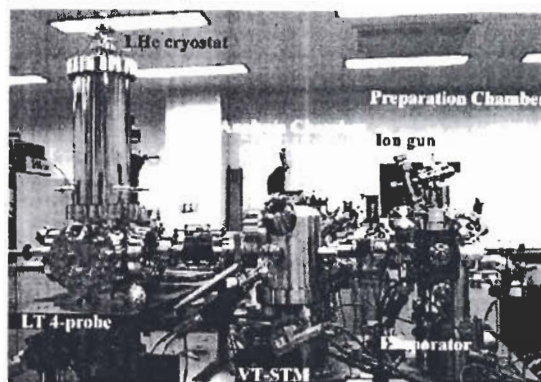


図1 メタルナノドット・ナノワイヤ構造創製プロセスのための UHV-STM システム

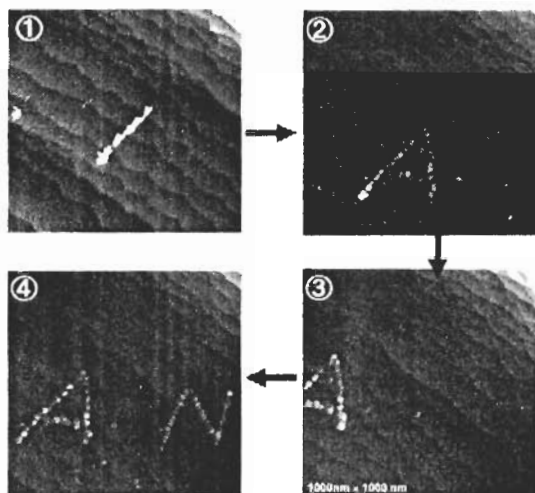


図2 Ag 被覆 STM 探針を用いた電圧パルス法により清浄な Si(111)-(7×7) 表面上に、Ag のナノワイヤとナノキャラクター（アルファベット文字：A と N）を作製した場合の STM 像

加中での電流を調べることにより容易に実証することができた。

4. 今後の展望

メタルナノドット・ナノワイヤ構造創製プロセスのための UHV-STM システムおよびナノ構造創製のための STM 探針物質移送技術を開発した。STM 探針先端からの物質移送による新しいナノ構造創製手法（点接触型電圧パルス法）を用いれば、ナノスケールのメタルドットおよびワイヤを

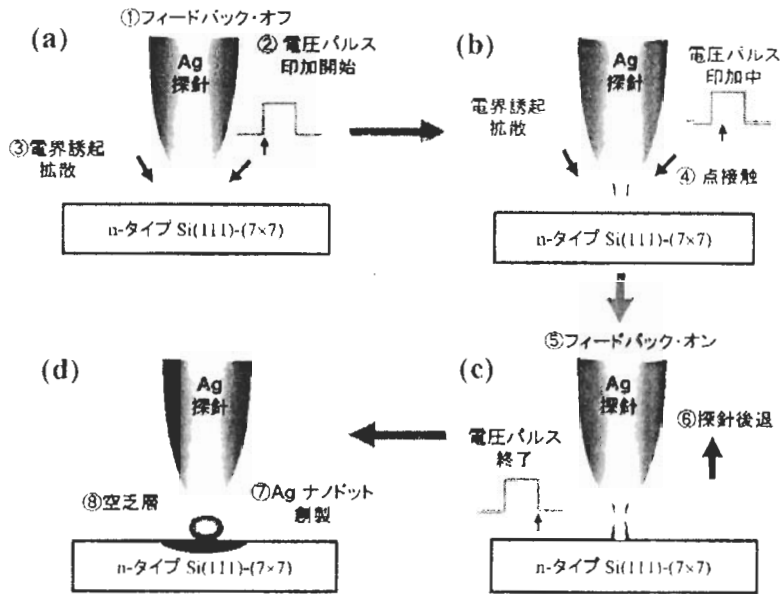


図3 電圧パルス法により Ag 探針から表面に Ag 原子が移送するメカニズムの模式図 (点接触モデル)

原子レベルで清浄な導電性基板表面上に100%の再現性で創製できることを実証した。このようなナノ構造創製手法は、ナノデバイスの基本的な回路パーツを創製するために必要不可欠な要素技術であり、ナノテクノロジーの発展に伴い、今後大いに技術開発が進展するものと期待できる。

文献

- 1) D. Fujita, Q.-D. Jiang, H. Nejoh: *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14: 3413-3421 (1996).
- 2) D. Fujita, T. Kumakura: *Appl. Phys. Lett.*, 82: 2329-2331 (2003).
- 3) 藤田大介, 鷺坂恵介, 大木泰造: *日本金属学会報* まてりあ, 43: 721-729 (2004).